

RENÉ PHILIPPE

LE BOUCLIER
ET LES MÉTHODES NOUVELLES DE PERCEMENT DES SOUTERRAINS

PARIS

CH. BÉRANGER EDITEUR



LE BOUCLIER

ET LES MÉTHODES NOUVELLES

DE

PERCEMENT DES SOUTERRAINS

LE BOUCLIER

ET LES MÉTHODES NOUVELLES

DE

PERCEMENT DES SOUTERRAINS

PAR

RENÉ PHILIPPE

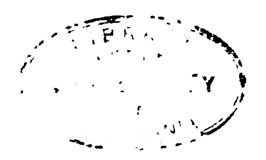
Ingénieur des Ponts et Chaussées.

PRÉFACE DE M. L. BIETTE

Ingénieur des Ponts et Chaussées,
Adjoint à l'Ingénieur en Chef du Métropolitain.

---

225 figures dans le texte.



PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, CH. BÉRANGER, ÉDITEUR

SUCCESSEUR DE BAUDRY ET Cie

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1900

PRÉFACE

Paris a vu s'ouvrir en 1898 et en 1899 de vastes chantiers pour le prolongement du chemin de fer d'Orléans jusqu'au quai d'Orsay et pour la construction de la première fraction du réseau métropolitain municipal. Il fallait en un laps de temps très court exécuter près de vingt kilomètres de souterrains à grande section sous des voies publiques pour la plupart très fréquentées et où il n'était pas possible d'interrompre la circulation. On résolut d'utiliser dans la construction de ces souterrains le bouclier qui venait d'être employé avec succès au collecteur de Clichy et qui permettait l'établissement d'un simple revêtement maçonné. Quinze de ces engins furent mis successivement en service à Paris ; ils fournirent des carrières diverses.

Le fonctionnement de ces boucliers intéressa un de nos jeunes camarades : M. René Philippe, Élève Ingénieur des Ponts et Chaussées, qui en 1899, au cours d'une de ses missions annuelles, suivit avec beaucoup d'attention les chantiers ouverts dans Paris. Il recueillit sur ce sujet des renseignements très complets et très précis qu'il sut présenter d'une façon attrayante et originale dans son journal de mission. Ce travail fut remarqué et son auteur encouragé à publier ses notes sur l'emploi du bouclier. De là est né

l'ouvrage que M. René Philippe présente aujourd'hui au public.

Dans une première partie, M. Philippe a réuni et intelligemment coordonné les renseignements nombreux qu'il a recueillis au cours de ses tournées sur les chantiers de la Compagnie d'Orléans, sur les chantiers du Métropolitain, et aussi, en dehors de Paris, sur les chantiers ouverts par le service municipal de l'assainissement pour l'extension des irrigations à l'eau d'égout vers Méry et Triel, et par la Compagnie de l'Ouest à Meudon, sur la ligne d'Issy à Viroflay. Cette première partie se termine par un aperçu des travaux analogues exécutés à l'étranger dans ces dernières années. Le lecteur trouvera là des documents intéressants concernant la construction et l'emploi des divers types de boucliers mis en service sur ces différents chantiers.

M. René Philippe a ensuite tenté, dans la seconde partie de son ouvrage, de dégager de la comparaison des boucliers qu'il a vu fonctionner des règles générales sur l'application de la méthode, la construction de l'engin et son utilisation. L'étude est consciencieuse, et bien qu'il soit permis de ne pas partager toutes les opinions émises par le jeune auteur sur un sujet particulièrement délicat et difficile, il faut reconnaître avec lui que si le bouclier actuel n'est pas parfait, il n'est pas téméraire de penser qu'au prix de quelques perfectionnements, on pourra en tirer un instrument pratique, sûr et commode, susceptible de rendre d'utiles services, à la condition toutefois qu'on n'en veuille pas faire une panacée universelle et qu'on ne l'emploie par sans discernement.

Il y a certainement là d'intéressantes études à entreprendre, et l'expérience qui vient d'être tentée en grand à

Paris, en mettant en relief les qualités et les défauts des boucliers actuels fournira des bases utiles pour ces études.

Il convenait donc de réunir et de coordonner les résultats acquis dans cette expérience. Le livre que publie aujourd'hui M. René Philippe renferme des renseignements précieux à cet égard. Cette œuvre d'un jeune ingénieur sincère et consciencieux sera lue avec profit non seulement par ceux, — de plus en plus nombreux, nous en sommes persuadé, — qui auront à construire ou à utiliser le bouclier, mais encore par ceux qu'intéressent les progrès réalisés journellement dans l'outillage de nos grands chantiers de travaux publics.

L. Biette.

Paris, 1er avril 1900.

LE BOUCLIER

INTRODUCTION

Le terme de « Bouclier » servit dès le principe à désigner le blindage dont on revêtait le front d'attaque, dans les travaux souterrains, pour limiter les éboulements et parer aux accidents. Peu à peu son acception s'étendit ; aujourd'hui on l'applique à un engin qui ne s'accompagne plus que rarement d'un masque antérieur ; on appelle en effet de ce nom une sorte de carapace métallique remplaçant les anciens boisages compliqués, encombrants, parfois insuffisants et toujours coûteux ; cette carapace protège les mineurs qui fouillent à l'avant et les équipes qui exécutent le revêtement à l'arrière ; elle se déplace par ses propres moyens et progresse par intermittence, mais de façon à toujours assurer la sécurité du personnel et de l'ouvrage.

Le bouclier fut inventé en 1825 par l'ingénieur français Brunel pour le percement d'un tunnel sous la Tamise, à Londres, dans des conditions difficiles. Le résultat fut tel que son emploi s'étendit bientôt à l'Angleterre et à l'Amérique : on le fit servir d'une façon constante au franchissement des nappes d'eau et à la pose d'un revêtement de fonte ou de fer, chaque application apportant avec elle son contingent d'expérience et sa part de perfectionnement.

En 1892, M. Berlier introduisit la méthode et l'engin en France et réussit à exécuter le siphon de Clichy, puis le siphon de la Concorde en 1895.

Cette même année au collecteur de Clichy, M. Chagnaud, dans

la partie extra-muros, puis en 1896 M. Fougerolles dans la section intra-muros transformèrent radicalement le bouclier en renonçant à la section circulaire et aux anneaux métalliques restés jusque-là classiques.

Du coup il cessa d'être un outil exceptionnel et parut susceptible d'applications nombreuses. Précisément l'approche de l'Exposition universelle de 1900 donnait aux travaux souterrains une activité considérable : construction d'un chemin de fer métropolitain à Paris, remaniement de collecteurs, prolongement de la ligne d'Orléans à l'intérieur de la ville, etc. Un vaste champ d'expériences s'ouvrait pour la méthode si ingénieusement rénovée : sans perdre de temps on en profita.

Tous ces travaux aujourd'hui sont terminés ou s'achèvent ; l'une après l'autre les différentes armatures mises en service, arrivées à la fin du parcours qu'elles devaient effectuer, cessèrent de fonctionner et furent démontées : le moment est bien choisi pour rechercher et formuler l'enseignement que comporte un essai si fécond tenté en des conditions si diverses. Certes il appartenait à de plus autorisés d'entreprendre une pareille étude ; mais il s'est trouvé que par suite de circonstances exceptionnelles nous avons pu suivre presque tous les chantiers : l'abondance de nos notes était telle qu'on nous demanda de les rédiger et de les publier : le présent volume en est né.

C'est assez dire que nous n'avons pas eu la prétention de continuer (et encore moins de refaire) l'œuvre magistrale de M. l'ingénieur en chef Legouèz ; nous n'avons voulu que citer des faits exposer des résultats, apporter des documents, en un mot amasser des matériaux où chacun pût éclairer sa conscience et se former une opinion en toute connaissance de cause.

La première partie de ce travail comprend la description impartiale des méthodes, des engins et des chantiers. L'ordre chronologique était le plus naturel ; nous l'avons suivi dans l'ensemble ; mais toutes les fois que pour un même ouvrage plusieurs engins fonctionnèrent successivement, nous les avons rapprochés les uns des autres pour éviter les répétitions fastidieuses. A plusieurs reprises nous avons insisté sur les incidents de marche et surtout sur les déboires éprouvés : c'est que, plus encore que la

réussite, l'insuccès est profitable ; dissimuler une erreur c'est s'exposer à la voir se renouveler dans l'avenir.

Nous avons rapidement résumé les travaux des collecteurs de Clichy ; quoiqu'on les ait déjà plusieurs fois décrits, cela nous a paru nécessaire, d'abord parce que tous les boucliers actuels dérivèrent de celui de M. Chagnaud, ensuite parce qu'à notre connaissance personne n'a donné de conclusions relatives à la partie intra-muros.

Nous avons terminé par quelques brèves pages sur les plus intéressantes applications tentées à l'étranger, en nous bornant à celles dont l'étude était profitable.

La deuxième partie est plus délicate : nous y avons comparé les procédés, les armatures, les résultats, en vue d'en dégager l'expérience du passé. Nous nous sommes constamment efforcé d'appuyer d'un fait chacune de nos conclusions : cela permettra à tout le monde d'en contrôler la valeur. Si le lecteur ne partage pas les avis que nous avons émis, il pourra se former lui-même une conviction rien qu'en se reportant à la première partie ; et si son expérience consommée lui suggère quelque observation qui nous ait échappé ou nous ait paru secondaire, c'est avec reconnaissance que nous accueillerons ses critiques.

En vue de donner à notre œuvre un caractère de documentation précise et complète, nous n'avons rien épargné pour en rassembler les éléments épars dans les différents services ; et ce ne fut pas toujours chose commode que d'obtenir de certains constructeurs des dessins exacts et des indications dignes de foi. Quant aux dispositions et aux engins, s'il nous est arrivé d'en condamner quelques-uns, ce n'est pas dans un esprit de critique, toute tentative est respectable en soi ; dans la lutte contre des difficultés nombreuses, variées et souvent mal connues, l'échec n'est pas un déshonneur : celui-là est toujours louable qui s'est efforcé d'innover et d'apporter sa pierre à l'œuvre commune.

Nous ne terminerons pas sans adresser nos remerciements sincères à MM. les Ingénieurs en Chef, chefs des différents services et à leurs aimables collaborateurs : leurs conseils éclairés, la facilité qu'ils nous ont donnée de suivre leurs travaux nous ont été pré-

cieux à plus d'un titre. M. Biette, à qui nous devions déjà beaucoup, nous a fait l'honneur de préfacer cette étude, nous sommes heureux de pouvoir lui renouveler ici l'assurance de notre gratitude.

René Philippe.

A Paris, le 15 mars 1900.

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER

COLLECTEUR DE CLICHY[1]

1° Partie extra-muros

Exposé. — Le collecteur de Clichy sert, concurremment avec le collecteur d'Asnières, à conduire à l'usine municipale de Clichy, les eaux d'égout de la portion de la ville située sur la rive droite de la Seine. De Clichy les eaux sont rejetées dans les champs d'épuration de Gennevilliers et d'Achères.

Parti de la place de la Trinité, le collecteur suit la rue de Clichy, l'avenue de Clichy et le boulevard National. L'exécution de cet ouvrage, d'une longueur totale de 4 328,56 m., fut divisée en deux lots correspondant aux deux fractions intra-muros et extra-muros.

La partie extra-muros fut construite de 1895 à 1897 par la méthode du bouclier.

Profils en travers et en long. — Le profil en travers (fig. 1) est celui d'un égout : une cunette de 2 m. de hauteur et 4 m. de largeur, deux risbermes de 0,90 m., une voûte de 2,50 m. de montée. La largeur totale de la section libre est de 6 m., la hauteur sous clef de 5 m.

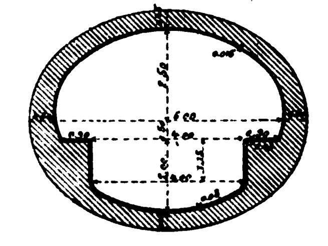


Fig. 1. — Profil en travers du collecteur.

Le profil en long (fig. 2) présente une pente continuelle de 0,50 m. par kilomètre ; le point le plus haut de l'extrados reste de 0,40 m. à 3 m. au-dessous de la chaussée. La longueur totale est de 1753,26 m.

[1] La plupart des figures de ce chapitre ont été empruntées à l'ouvrage de M. Legouëz.

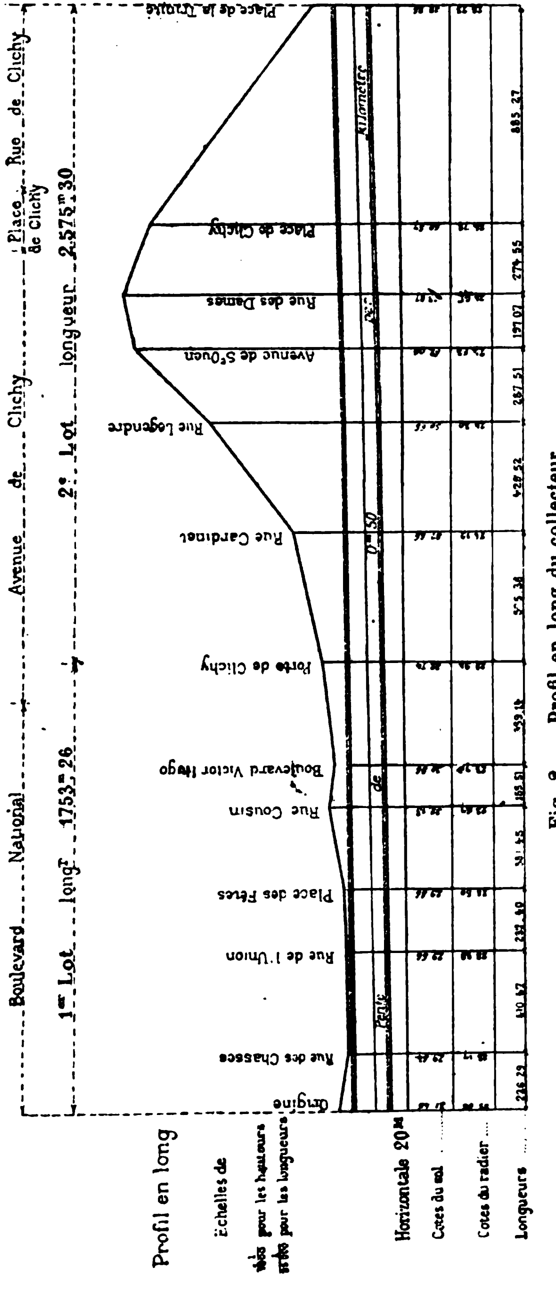


Fig. 2. — Profil en long du collecteur.

Bouclier métallique. — L'adjudicataire fut M. L. Chagnaud au prix de 1016,60 fr. le mètre courant. Son bouclier (fig. 3 et 4)

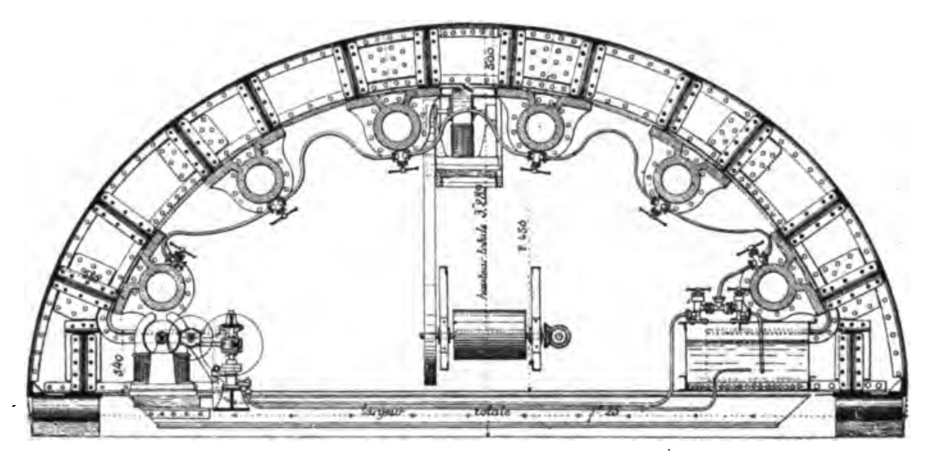


Fig. 3. — Coupe transversale du bouclier.

avait les dimensions de la demi-section elliptique du collecteur, 7,25 m. × 2,95 m.

Deux poutres distantes de 1,40 m. d'axe en axe étaient les éléments essentiels de la résistance ; elle avaient 12 mm. d'épais-

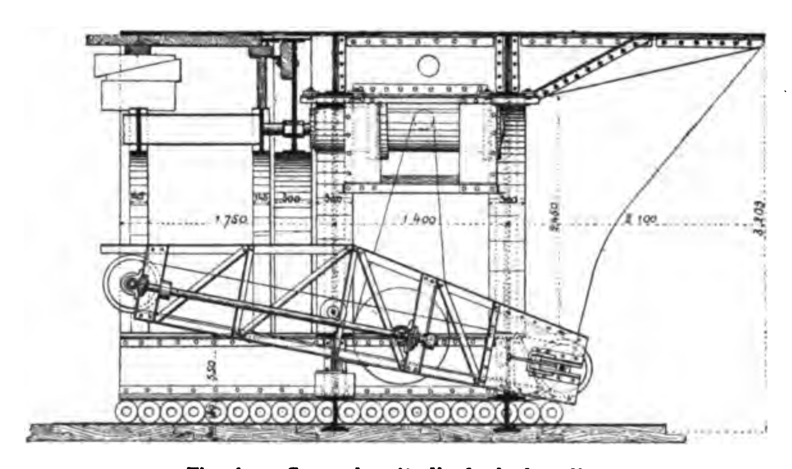


Fig. 4. — Coupe longitudinale du bouclier.

seur d'âme, 50 cm. de hauteur ; la semelle inférieure avait 0,30 m. de largeur, 20 mm. d'épaisseur ; des cornières de $\frac{80 \times 80}{10}$ la réunissaient à l'âme.

La tôle d'enveloppe rivée sur les cornières supérieures des poutres avait 14 mm. d'épaisseur. Douze entretoises longitudinales reliaient les deux poutres elliptiques ; elles étaient formées d'une âme de 10 mm. d'épaisseur et de 0,50 m. de hauteur fixées par des cornières $\frac{80 \times 80}{10}$. La longueur totale de l'armature était de 5,25 m. ainsi répartie :

Avant-bec	2,10	m.
Corps	1,40	
Queue	1,75	
Total	5,25	m.

La tôle d'avant-bec découpée en visière était renforcée sur toute sa longueur par 12 consoles. Au contraire la tôle de la queue, coupée carrément, était entièrement en porte à faux.

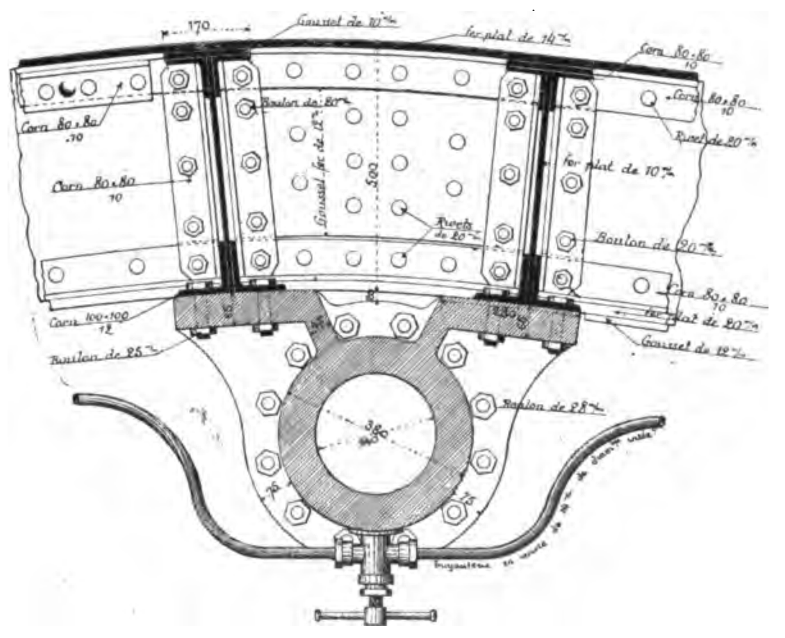


Fig. 5. — Détail d'une poutre et support d'un vérin.

Au début le plancher de contreventement s'élevait à 1 m. au-dessus du fond de la chambre de travail ; mais on coupa bientôt les deux poutres transversales qui le formaient sur 4 m. de longueur et on rétablit le plancher à 0,52 m. en dessous de sa première position avec deux poutres de 0,279 m. de hauteur.

Les dimensions extérieures de l'armature étaient :

Hauteur	3,289 m.
Largeur	7,25
Longueur	5,25

Vérins. — En dessous des poutres étaient placés six vérins (fig. 5) espacés de 1,20 m. à l'aplomb des entretoises.

Leur diamètre intérieur (fig. 6) était de 0,24 m. leur épaisseur de

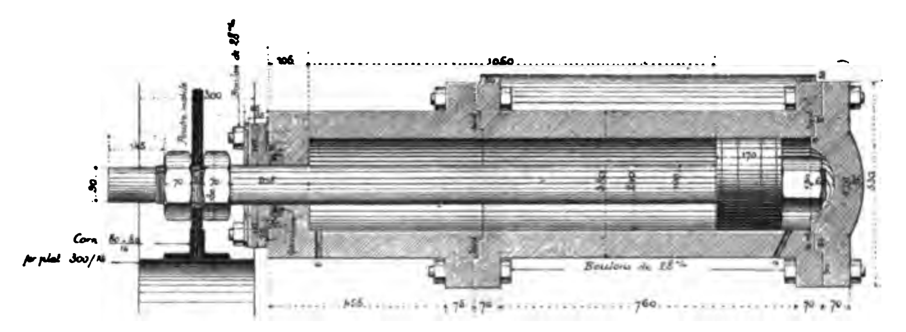


Fig. 6. — Coupe longitudinale d'un vérin.

0,07 m. leur course de 1 m. La pression de l'eau variait de 50 à 200 kg. par cm^2, soit 22 t. à 90 t. par vérin, ou 135 t. à 540 t. comme effort total.

Les tiges de tous les vérins, de 0,10 m. de diamètre étaient réunies à une poutre mobile sous la queue du bouclier ; les vérins étaient à double effet.

Appui du bouclier. — Toute la charge était transmise au chemin de roulement par deux poutres longitudinales de 0,55 m. de hauteur régnant depuis la poutre elliptique d'avant jusqu'à l'extrémité de la queue et formées d'une âme de 20 mm., de 2 semelles de 300 × 20, et de quatre cornières de $\frac{80 \times 80}{12}$. Les rouleaux en fonte avaient 0,18 m. de diamètre extérieur, 0,06 m. de diamètre intérieur, 0,50 de longueur.

Le chemin était constitué par des madriers de 0,13 m. × 0,50 m. × 1,00 m. assemblés à mi-bois et garnis d'une tôle de 0,01 m. d'épaisseur.

Cintres et entretoises. — Le bouclier prenait appui contre trente

cintres (fig. 7 et 8) solidement entretoisés. Chaque cintre était cons-

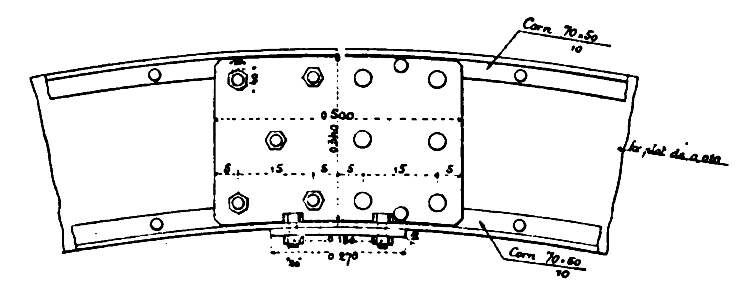


Fig. 7. — Assemblage d'un cintre. Élévation.

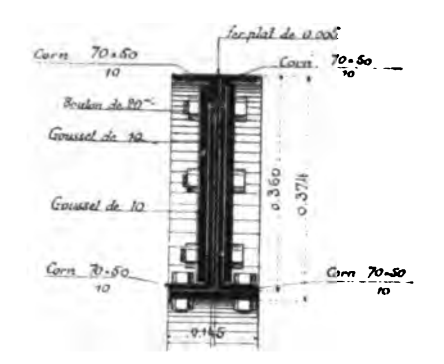


Fig. 8. — Assemblage d'un cintre. Coupe.

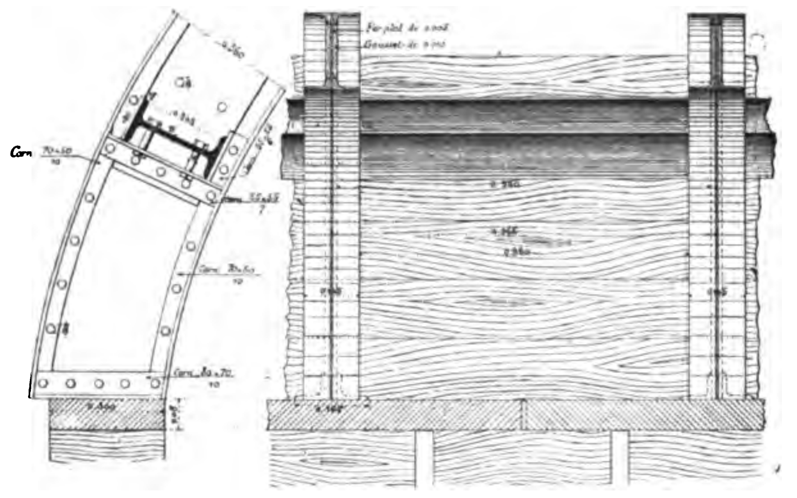


Fig. 9. — Détail des entretoises.

titué par un fer plat de 0,360 m. × 0,01 m. et quatre cornières

de $\frac{70 \times 50}{10}$; on le formait de deux demi-cintres assemblés par trois éclisses : deux latérales et une inférieure.

L'espacement était de 1 m. d'axe en axe; un fer en double T (fig. 9) entretoisait les cintres au droit de chaque vérin au moyen de cornières de $\frac{55 \times 55}{7}$ et de boulons de 18 mm.

Poutre mobile. — L'appui des vérins n'était pas direct; il s'effectuait au moyen d'une poutre elliptique mobile destinée à répartir uniformément la pression (fig. 10).

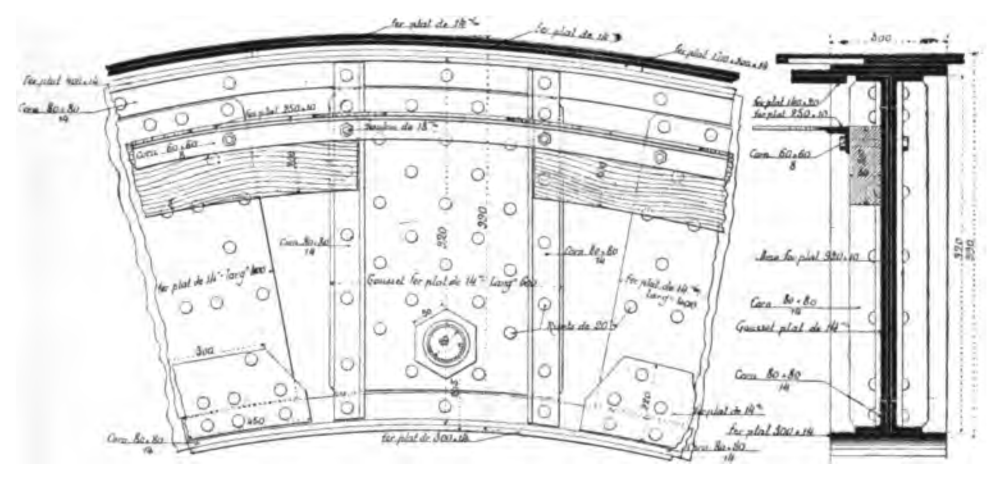


Fig. 10. — Détails de la poutre mobile.

Cette poutre avait 0,90 m. de hauteur, 0,01 m. d'épaisseur; elle était formée d'une âme et de cornières de $\frac{80 \times 80}{14}$, d'une semelle inférieure de 0,014 m. $\times$ 0,30 m. et d'une semelle supérieure de 0,014 m. $\times$ 0,40 m.

Montage du bouclier. — Essais. — Pour ne pas interrompre la circulation on effectua le montage dans un carrefour, en fouille blindée, du 21 novembre au 8 décembre 1895. Dans la nuit du 10 au 11 décembre on ripa le bouclier à son emplacement définitif, dans la galerie qu'il devait prolonger.

Dès le début quelques incidents se produisirent : les vérins se brisèrent tous; le plancher était trop haut : on l'abaissa; l'avant-

bec parut un peu court (il n'avait que 1,20 m.) : on l'allongea.

L'avancement ne fut guère que de 2,50 m. par jour pendant les trois premiers mois.

Fonctionnement du bouclier. — Blindage du ciel. — Après avoir déblayé sous l'avant-bec suivant un talus aussi raide que possible on creusait latéralement un four pour loger les longerons et les rouleaux d'avancement; puis on mettait la pression sur les vérins; pendant le mouvement en avant du bouclier la poutre mobile serrée contre le blindage supportait la queue; quand on ramenait les vérins, la poutre revenait avec eux et dégageait la queue.

Sous la tôle devenue libre on montait et réglait un cintre, ceci portait à deux le nombre des cintres abrités par l'enveloppe;

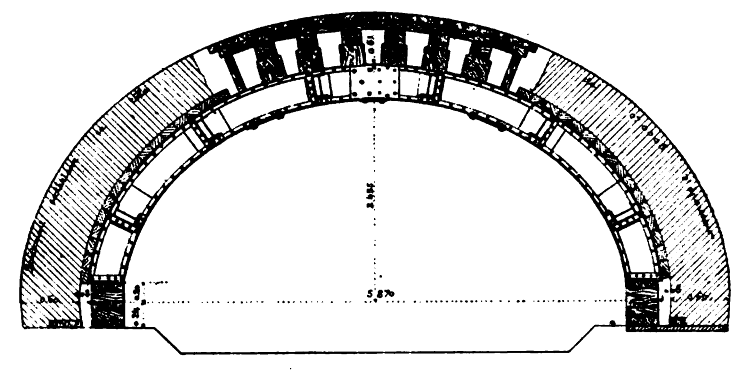


Fig. 11. — Coupe transversale dans la partie boisée.

sur le cintre primitif on plaçait des coins de serrage, un faux chapeau et l'extrémité des couchis (0,08 m. × 0,16 m. × 1,00 m.); l'autre extrémité des couchis était provisoirement posée sur la couronne de la poutre mobile ; à l'aide d'un faux chapeau et de butons placés sur le cintre nouveau on serrait le blindage sous l'enveloppe en dégageant la poutre (fig. 11).

Pendant la course suivante, en frappant sur les coins, on appliquait les couchis contre le terrain.

On était dès lors ramené au procédé ordinaire d'exécution de la calotte dans une fouille blindée; on retirait un à un les couchis de blindage pour les reporter sur les cintres.

Afin d'éviter, soit de laisser des bois au-dessus de l'extrados, soit de permettre au sable de fluer quand on retirait tout, on emprisonnait entre la terre et des couchis des feuilles de tôle de 1,00 m. × 1,00 m. × 1/2 mm. repliées à leurs extrémités pour empêcher leur entraînement par le bouclier.

Vitesse. — Quand le travail fut devenu normal, on fit 4,51 m. par jour, et même 5,45 m. si on tient compte des arrêts.

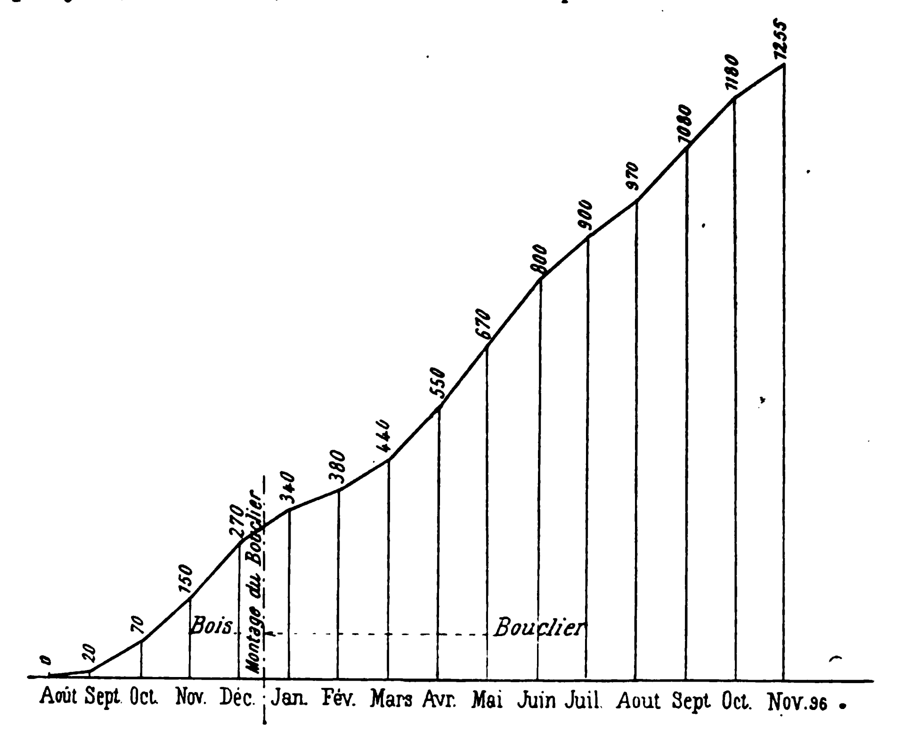


Fig. 12. — Diagramme de marche.

La vitesse maxima fut de 9,10 m. par 24 heures.

Le diagramme ci-dessus (fig. 12) résume la marche.

Du 10 août au 2 décembre 1895 on avait exécuté sur bois 453 m. de voûte, soit 3 m. par jour environ, au moyen de trois équipes de 8 heures.

Installations mécaniques et organisation du chantier. — En raison de l'exiguïté de la section libre, dont la hauteur ne

dépassait guère 2 m. on dut recourir à des moyens mécaniques d'évacuation des déblais.

Une courroie en coton mue par une dynamo de 15 ampères sous 220 volts versait directement à l'arrière du bouclier les terres qu'elle recevait à l'avant; deux machines à vapeur remorquaient les trains jusqu'en aval du pont de Clichy, où s'opérait la décharge.

Les matériaux arrivaient par bateaux; on les chargeait avec un transporteur Temperley sur des wagonnets qui les conduisaient sur le chantier.

L'usine génératrice produisait 50 chevaux de force; une locomobile de Weyler et Richmond de 30 chevaux, une locomobile de Rouffet de 20 chevaux, actionnaient chacune une dynamo de 24 chevaux, débitant 80 ampères sous 220 volts.

La consommation d'énergie était celle-ci :

	Ampères
Dynamo-Gramme :	
1° Transporteur Temperley	50 à 60
2° Pompes élévatoires	15 à 25
3° Malaxeur	15
4° 8 lampes à arc	36
	116
Dynamo-Edison :	Ampères
1° Dynamo du bouclier	15 à 20
2° Dynamo du transporteur	15 à 20
3° 50 lampes	15
4° Ventilateur	34
	79
Total général	195

Il faut remarquer que les transporteurs, le bouclier et les pompes ne marchaient jamais simultanément, de sorte que la consommation totale n'atteignait que rarement les 160 ampères produits.

Terrains rencontrés. — Incidents et avaries. — On rencontra des vieilles maçonneries, qu'on dut démolir, et un banc de pouddingue dur sur 50 m. de longueur; à deux reprises on traversa des sables argileux mous, où il fallut battre des pieux

pour supporter le chemin de roulement; malgré les précautions prises, le bouclier s'enfonça légèrement; par la pose des madriers on le ramena insensiblement à son tracé primitif.

Quand le terrain était formé de sables fins, ils glissaient avec facilité le long de la tôle et déterminaient des tassements dans la chaussée; la circulation ne fut pourtant jamais arrêtée.

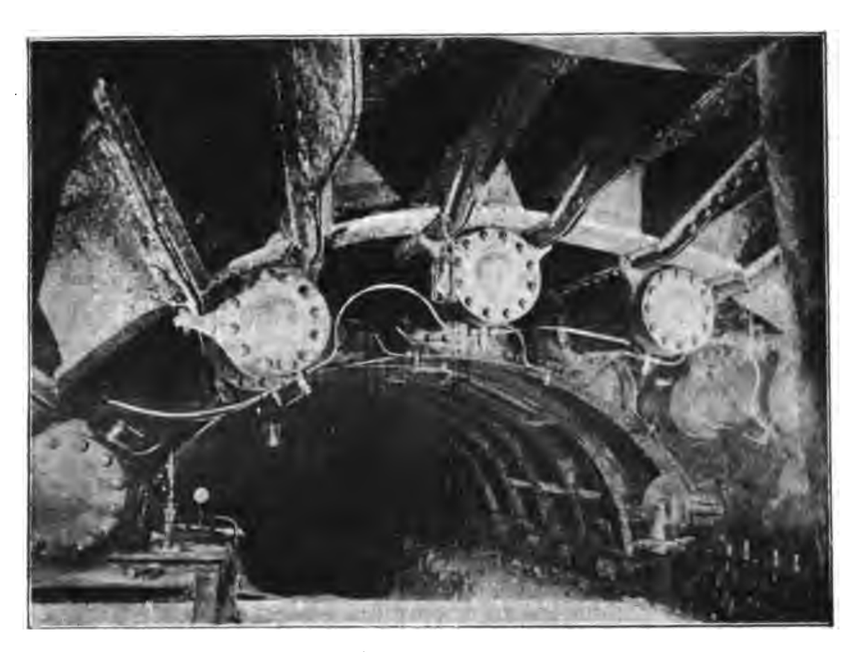


Fig. 13. — Vue du bouclier à la fin des travaux.

Le bouclier parcourut ainsi 1 255 m., de la place de la Trinité à la porte de Clichy, sans subir trop d'avaries; les tôles se faussèrent à peine; seule la poutre mobile était disloquée. Les cintres, quoique déformés, eussent encore pu servir. La figure 13 représente le bouclier à la fin des travaux, à la veille du démontage.

Conclusion. — Le plus grave reproche qu'on puisse faire à cette méthode c'est d'être un procédé mixte où l'emploi d'une armature métallique se combine avec celui des blindages comme dans l'exécution sur bois. C'est peut-être un avantage d'avoir un chantier de maçonnerie étendu, quoique ici la vitesse de progres-

sion n'était pas tellement grande qu'on ne pût suivre les mineurs dans la constructiou du revêtement ; s'est sûrement une dépense excessive que d'ajouter les frais des boisages à ceux d'un engin déjà coûteux par lui-même.

Les tassements n'étaient pas moindres que dans l'emploi exclusif du bois, ils étaient normalement de 0,06 m. : 3 cm. au moment de l'échappement de la queue du bouclier, 3 cm. pendant l'exécution de la maçonnerie et l'enlèvement du blindage ; et le plus clair résultat de cette présence du coffrage était d'empêcher l'injection qui aurait peut-être réussi à boucher les vides.

L'engin lui-même prêtait à la critique ; dans la demi-section déjà étroite et fort encombrée par les planchers et la machinerie, la progression par roulement n'était pas des plus aisées ; l'enlèvement, le transport et la pose des rouleaux de fonte se faisaient mal ; les ouvriers chargés de ce travail n'assuraient pas toujours le rouleau dans une bonne position ; le bouclier en s'engageant dessus avait une tendance à dévier de sa direction.

La poutre mobile était très mauvaise : elle rendait tous les vérins solidaires les uns des autres et elle les chargeait inutilement d'un poids vertical assez considérable, propre à donner des coincements et des bris de tiges.

Les entretoises étaient trop faibles pour supporter l'effort des vérins ; elles flambaient fréquemment et les cintres mal soutenus se déformaient.

2° Partie intra-muros

Exposé. — Sur la plus grande partie de sa longueur le collecteur de Clichy intra muros présente le *même profil en travers* que la partie extra-muros ; la largeur totale de l'ouvrage est donc de 7,20 m., la hauteur totale de 5,85 m.

Sur la seconde partie le collecteur affecte une forme un peu plus circulaire, la largeur totale extérieure étant de 6,10 m.

La pente est uniforme d'une extrémité à l'autre ; elle est de 0,50 m. par kilomètre.

La plus faible hauteur de terre sur l'extrados est de 5 m., la plus grande de 34 m.

Le travail fut mis en adjudication sur les prix de 1130 fr. le mètre courant pour le type n° 1, et de 960 fr. pour le type n° 2. M. Fougerolle fut déclaré adjudicataire avec un rabais de 31 p. 100, ce qui ramenait le prix du mètre courant pour le type n° 1 à 769,55 fr., et pour le type n° 2 à 662,40 fr. ; il devait effectuer le travail avec une armature tubulaire par une méthode toute différente de celle que nous venons de décrire.

Bouclier. — Le bouclier (fig. 14 et 15) se composait essentiellement d'une enveloppe en tôle de 14 mm. d'épaisseur épousant

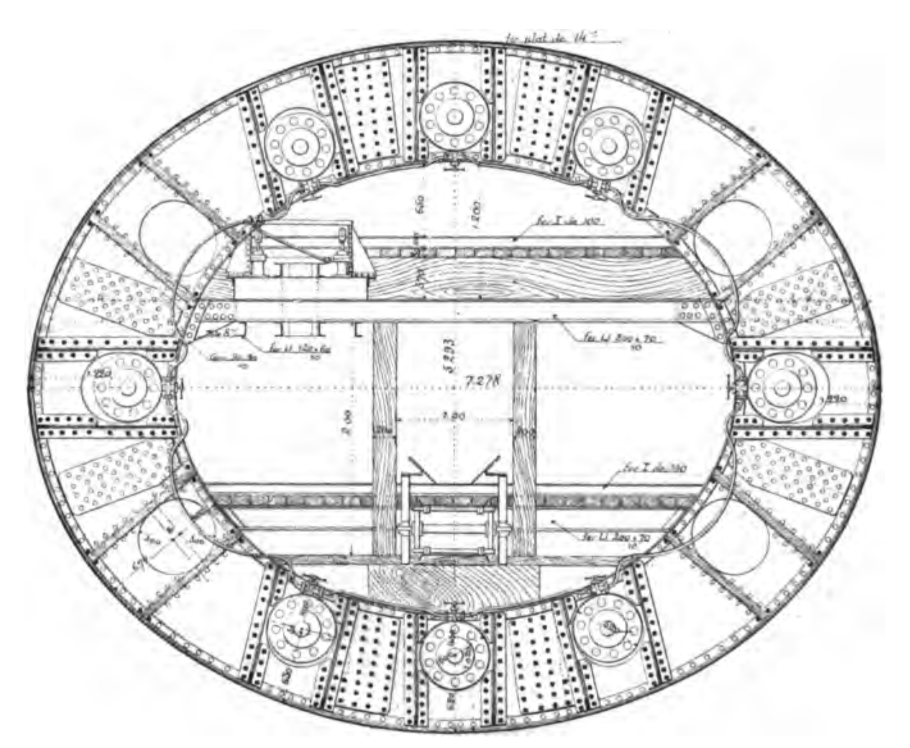


Fig. 14. — Coupe transversale du bouclier.

la forme de l'extrados des maçonneries, soutenue par deux grandes poutres elliptiques ; ces poutres elliptiques avaient 1,220 m. de largeur au niveau du grand axe, 1,020 m. de hauteur sur le petit axe ; elles étaient formées d'un fer plat de 10 cm. raidi par 4 cornières de $\frac{80 \times 80}{10}$ et entretoisées par 16 poutres

longitudinales de même hauteur servant en même temps à porter les vérins.

La longueur totale du bouclier était de 7,275 m. ainsi répartie :

Queue	2,955 m.
Corps	1,820
Avant-bec	2,50

L'avant-bec et l'arrière-bec étaient supportés par des consoles formées d'une âme de 10 mm. et de cornières de $\frac{80 \times 80}{10}$, mais à l'arrière la tôle doublée d'une seconde épaisseur restait en porte à

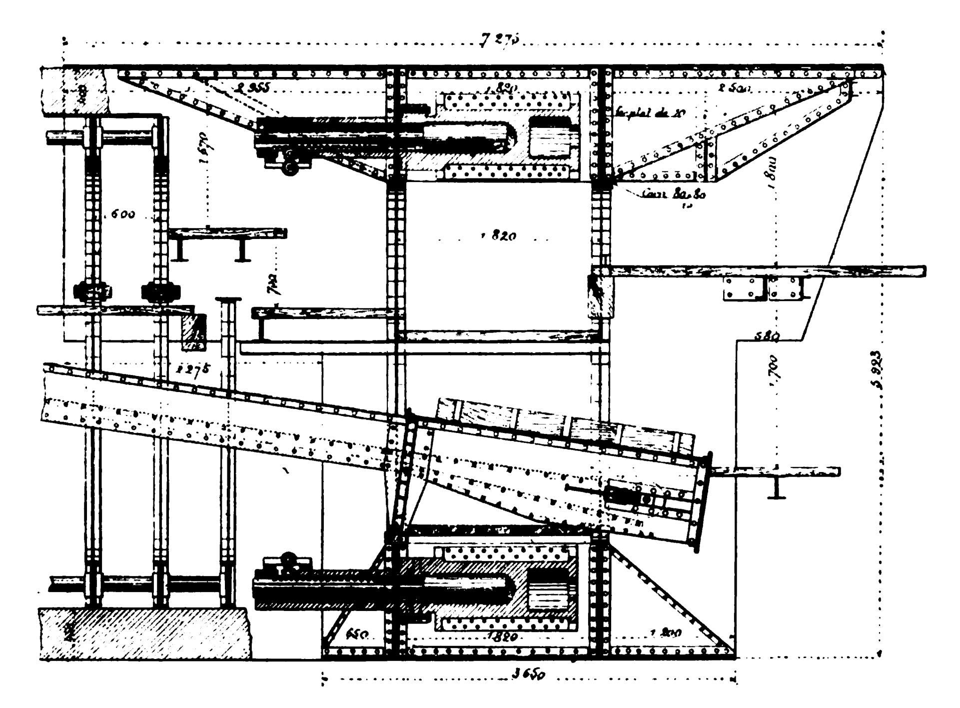


Fig. 15. — Coupe longitudinale du bouclier.

faux sur 0,50 m., c'est à son abri qu'on devait construire les maçonneries du revêtement ; dans cette partie, d'ailleurs, sur 2,275 m. de longueur, l'enveloppe n'existait que sur 2,790 m. de hauteur et non sur toute la surface de la section ; de même dans l'avant-bec, la tôle taillée en visière ne descendait sous le radier que à 1,135 m. de la première poutre.

La hauteur totale de l'appareil était de 5,92 m., sa largeur de 7, 278 m.

Sur le diamètre horizontal on avait prévu deux oreilles de section triangulaire destinées à empêcher le mouvement de rotation du bouclier autour de son axe ; mais on les supprima avant

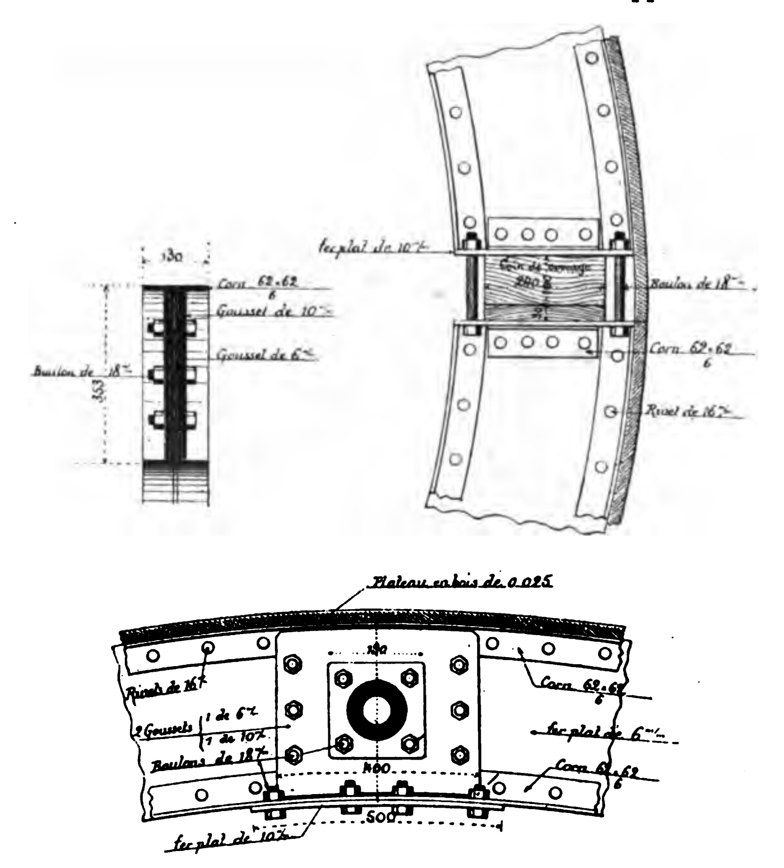


Fig. 16. — Cintres, élévation et coupe.

même la période des essais dans la crainte qu'elles eussent un effet tout contraire en s'engageant dans les lits plus ou moins obliques des terrains traversés.

Planchers. — L'avant-bec était partagé en trois chambres de travail par deux planchers placés : le premier à 1,800 m. au-dessous de la génératrice supérieure, le deuxième à 1,700 m. au-dessous du

du premier; portés par des fers en U, ces planchers avaient des longueurs différentes proportionnées au talus des terres du front d'attaque.

Dans le corps, un peu au-dessus des naissances, un solide plancher supportait la machinerie, dynamo et pompes.

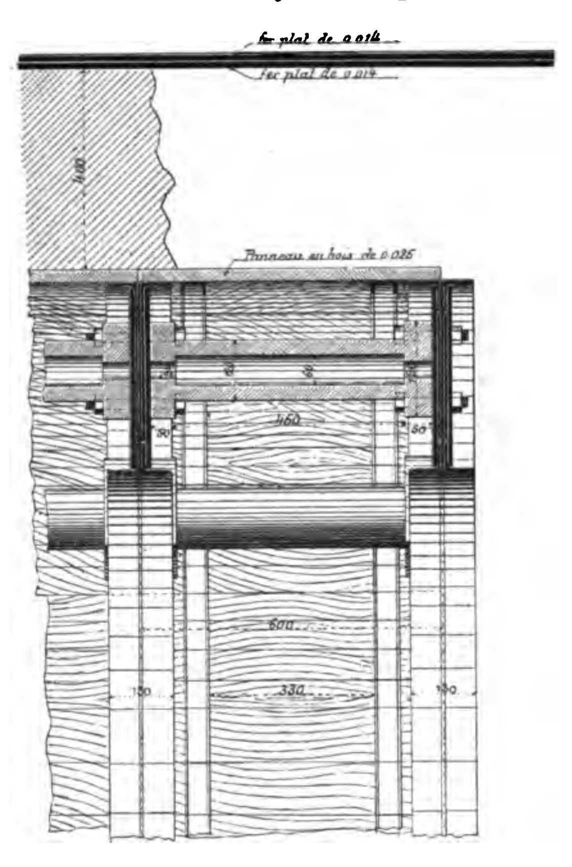


Fig. 17. — Cintres et entretoises. Coupe longitudinale.

Dans l'arrière-bec un plancher était placé pour les maçons à 1,670 m. de la génératrice supérieure, il se prolongeait jusqu'à 2 m. au delà de la poutre arrière.

Vérins. — L'appareil était disposé pour recevoir douze vérins; mais quatre des caissons de support ne furent jamais montés; il n'y avait, lors des essais, que sept vérins et ce ne fut que au

Fig. 18. — Élévation d'un cintre complet.

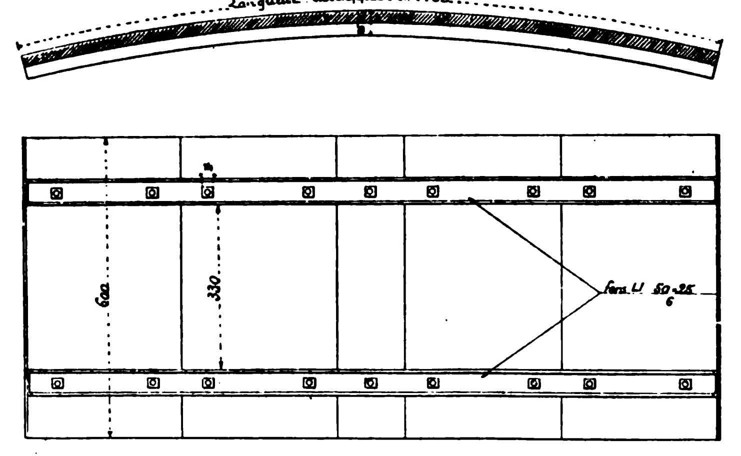


Fig. 19. — Détail d'un panneau remplaçant les couchis.

bout de sept mois de travail qu'on posa le huitième vérin, celui de clef ; deux des huit vérins étaient sur le diamètre horizontal, les six autres étaient groupés autour de l'axe vertical.

Les vérins étaient à simple effet, avec une course de 0,60 m., on les ramenait à leur position initiale par une manivelle commandant un pignon et une crémaillère.

Le diamètre du plongeur était de 0,24 m. ; sous la pression

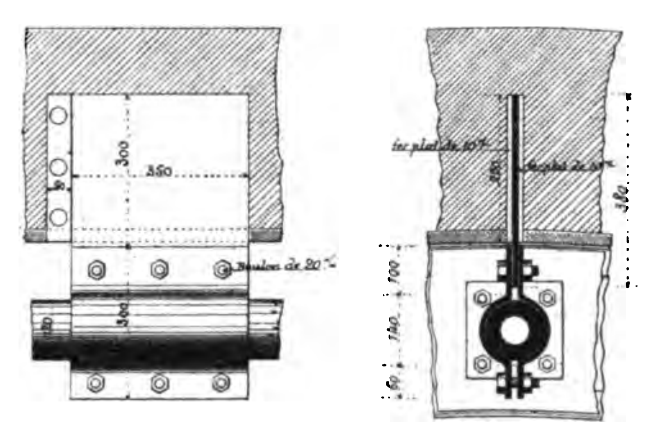


Fig. 20. — Détail de l'ancrage.

maxima de 200 kg. par cm^2 qu'il pouvait supporter chaque vérin développait 127 tonnes ; l'effort total de propulsion pouvait ainsi s'élever avec 7 vérins à 889 tonnes et avec 8 à 1016 tonnes.

En cours d'exécution on marcha souvent avec une pression de 22 kg. seulement soit 176 tonnes d'effort total avec les 8 vérins.

Cintres. — Les cintres métalliques étaient formés (fig. 16 et 18) par une âme de 6 mm. d'épaisseur, haute de 0,353 m. et par quatre cornières de $\frac{62\times62}{6}$; au droit de chaque vérin ils étaient renforcés par deux fourrures de 6 et de 10 mm. d'épaisseur et de 400 mm. de longueur, sur lesquelles s'appuyaient par des semelles des entretoises creuses (fig. 17) en fonte ayant 0,12 m. de diamètre extérieur et 0,06 m. de diamètre intérieur.

Chaque cintre était divisé en deux parties, la partie inférieure se plaçait sur la maçonnerie déjà exécutée et en avance sur la partie supérieure ce que permettait la disposition particulière de

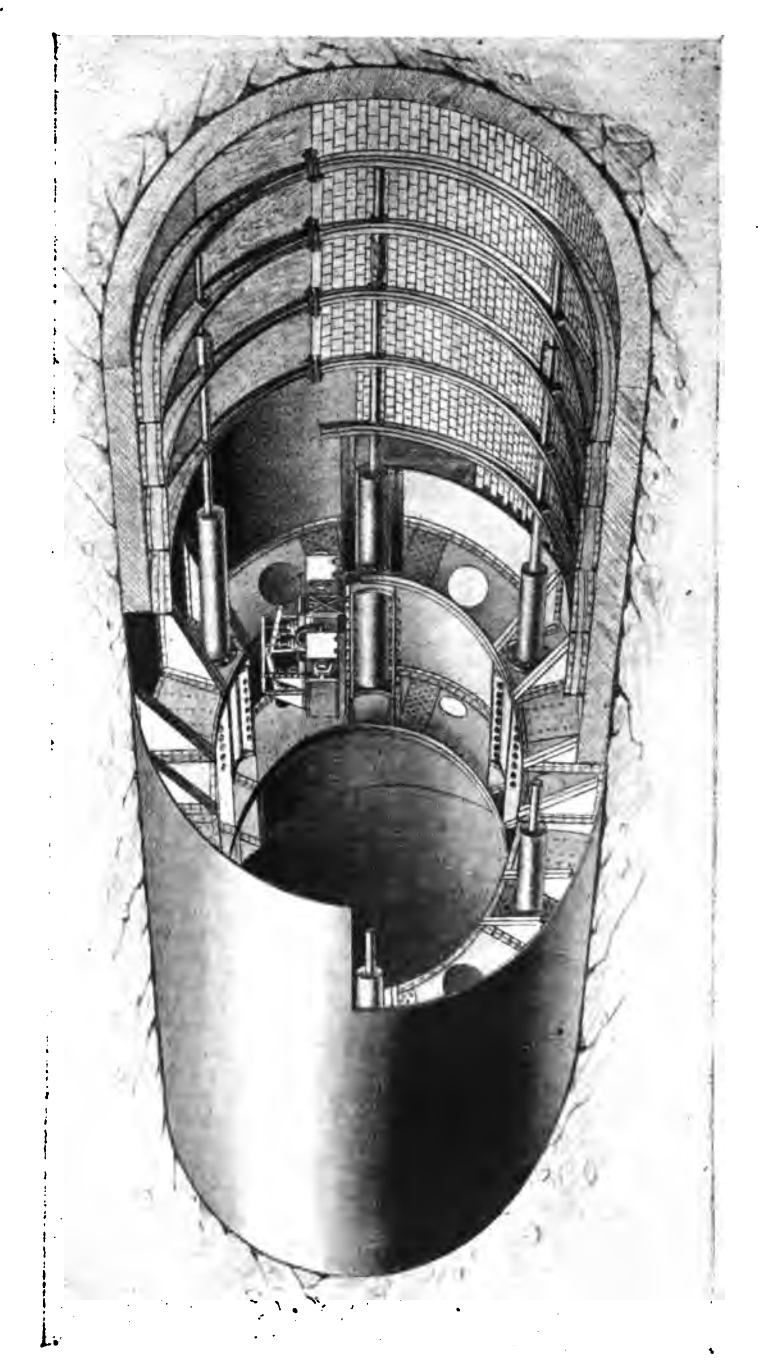


Fig. 21. — Vue perspective du chantier (le transporteur enlevé).

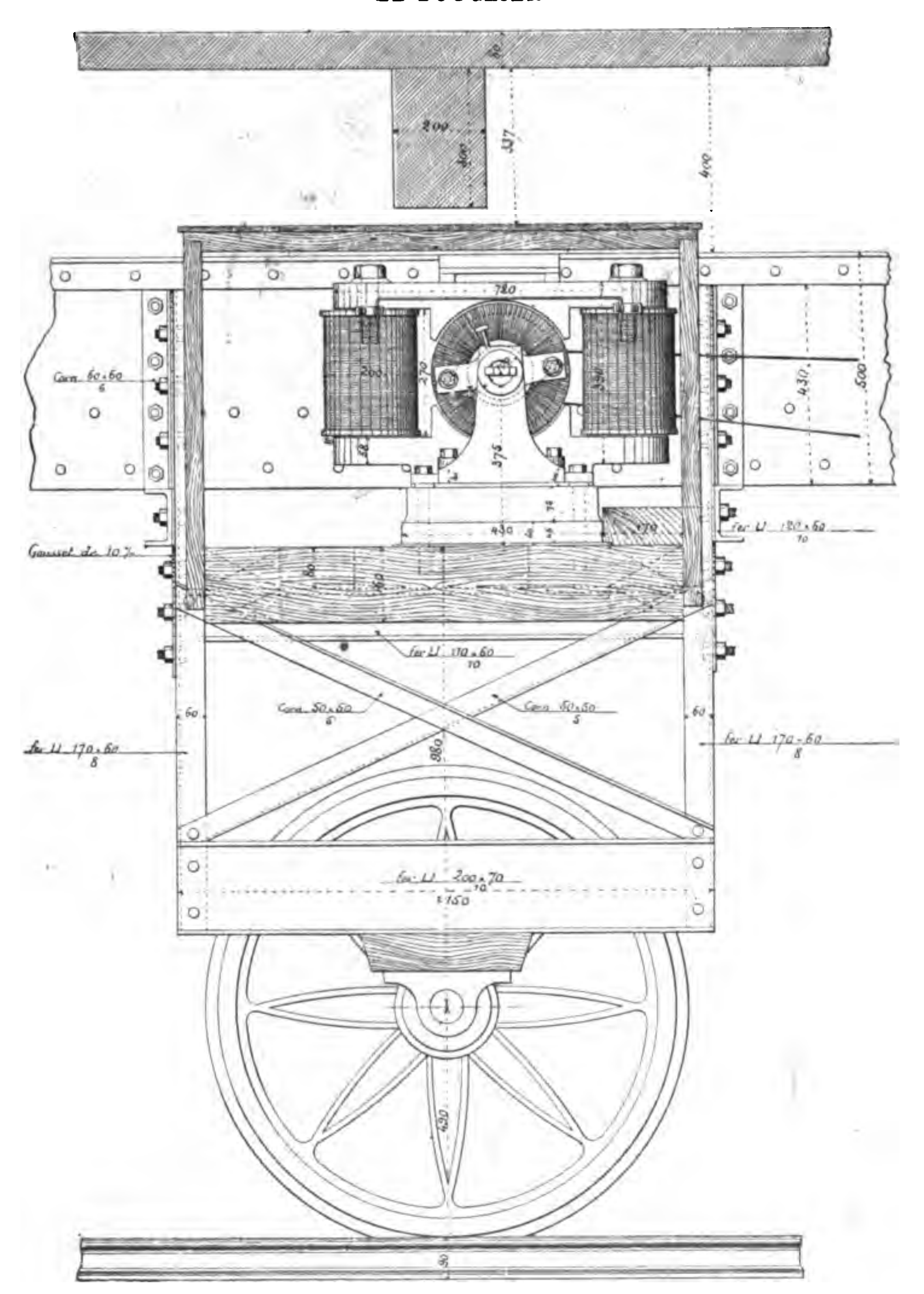


Fig. 22. — Chariot et moteur électrique du transporteur.

l'enveloppe. La partie supérieure recevait comme couchis, des panneaux en planches de 25 mm. assemblés sur deux fers en U de $\frac{50\times25}{6}$ et recouverts d'une mince tôle (fig. 19).

Les cintres étaient au nombre de trente et espacés de 0,60 m. d'axe en axe ; comme la voûte était clavée à mesure, elle les chargeait peu, ils n'auraient donc fourni qu'une résistance

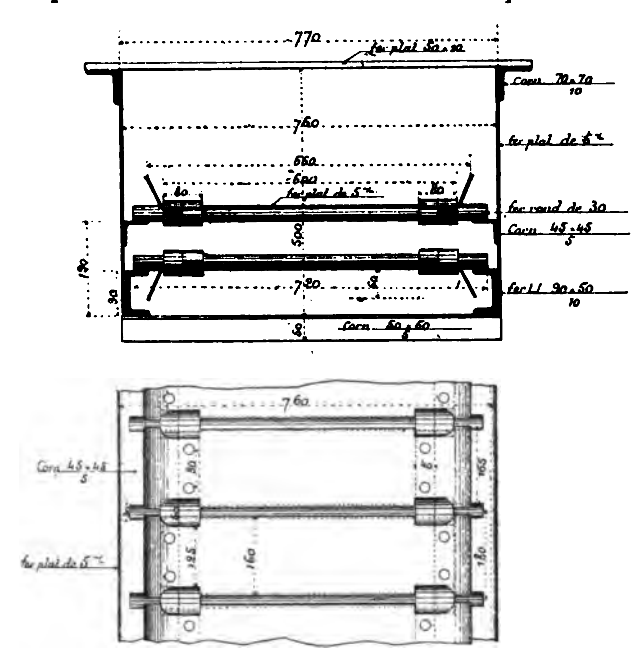


Fig. 23. — Coupe horizontale et coupe verticale du transporteur.

insuffisante pour l'avancement du bouclier, aussi les ancrait-on de distance en distance dans le revêtement. Tous les quatre cintres environ on fichait dans la maçonnerie des plaques de tôle percées d'œillets ; on y fixait au moyen de boulons de 20 mm. des colliers embrassant les entretoises (fig. 20). Bien entendu on ne mettait en service les ancrages d'un anneau que lorsque la maçonnerie de cet anneau avait fait une prise complète. Quand un ancrage devenait inutile il suffisait de l'arracher et de remplir son logement.

Installations accessoires. — Pour éviter l'encombrement dans une section aussi réduite, l'évacuation des déblais du front d'attaque

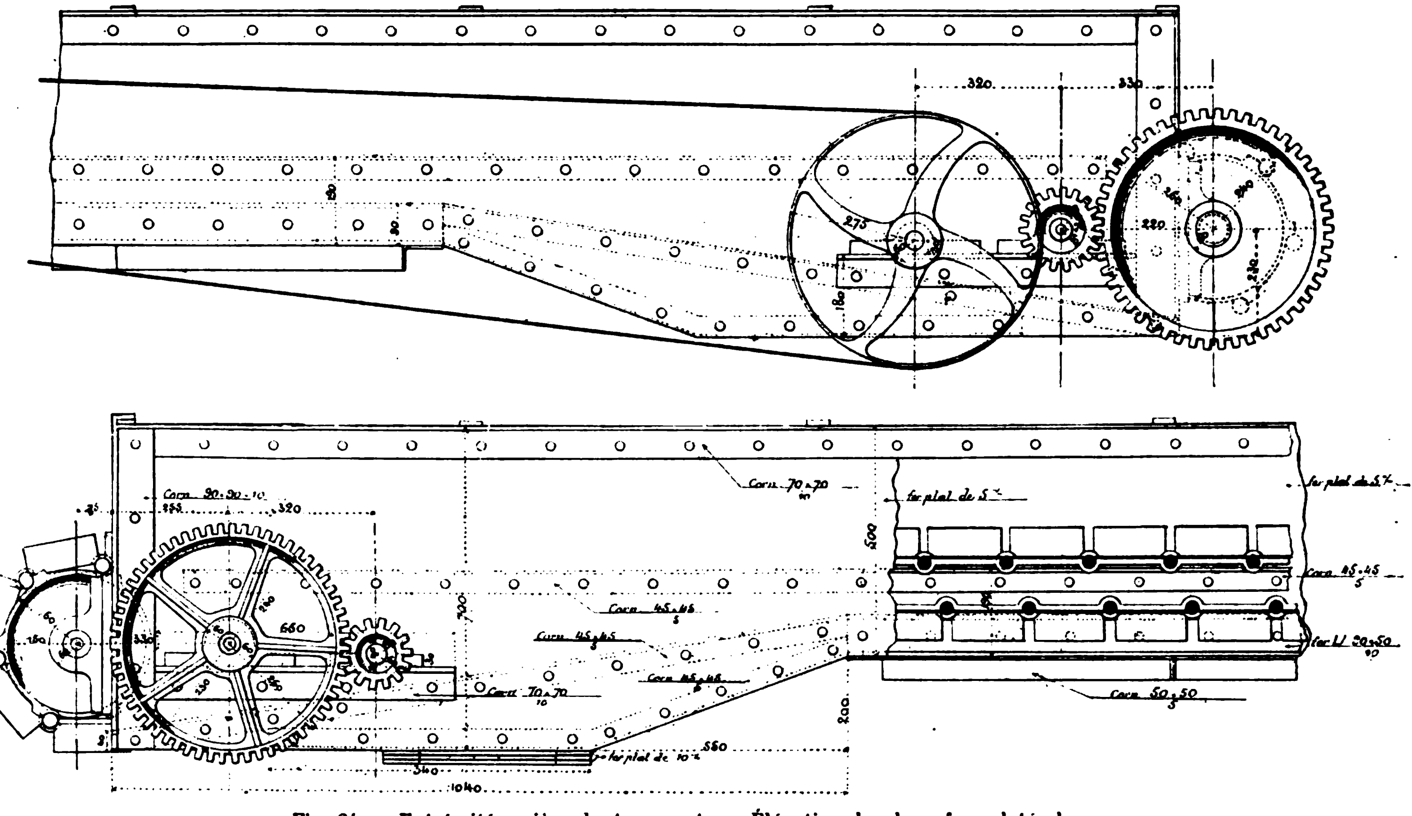


Fig. 24. — Extrémité arrière du transporteur. Élévation des deux faces latérales.

à l'arrière s'effectuait au moyen d'un tablier transporteur commandé par une dynamo. Le transporteur de 25 m. de longueur était formé de lames de tôles de 5 mm. d'épaisseur, 0,16 m. de longueur, 0,60 m. de largeur, à rebords, assemblées bout à bout par des axes formant charnière et support (fig. 22, 23 et 24) ; il rejetait directement les matériaux dans la rame de wagons placée au-dessous; même les déblais rocheux et les matériaux collants étaient ainsi rapidement évacués.

La dynamo réceptrice consommait 13 ampères sous une tension de 440 volts.

Les matériaux pour la maçonnerie arrivaient par une rampe qu'on déplaçait tous les 100 m. sur un plancher de service établi à la hauteur des naissance, par-dessus le transporteur (fig 27).

Fonctionnement. — Les ouvriers répartis dans les trois étages de la chambre de travail dégageaient l'avant à la demande; ceux du plancher médian jetaient directement leurs déblais sur le tablier transporteur; ceux du plancher supérieur les y faisaient descendre par une trémie; seuls les déblais du bas étaient repris à la pelle.

Le travail des maçonneries s'exécutait à l'arrière, sous la tôle, sur 3 anneaux de 60 cm. chacun correspondant respectivement au radier, aux piédroits et à la voûte; comme la partie inférieure des cintres était en avance de 0,60 m. sur la partie supérieure, la tige des vérins du bas était plus courte d'autant.

Au moment de la course, au moyen d'une fiche on bourrait du mortier entre l'extrados et la tôle d'enveloppe, non seulement pour combler les vides et former une chape protectrice, mais aussi et surtout pour empêcher l'entraînement des maçonneries fraîches.

Le gâchage du mortier s'effectuait sur le plancher du haut, pour tout le chantier ; on l'envoyait sur le radier au moyen de trémies, la partie inférieure du collecteur était donc entièrement dégagée.

Personnel et équipes. — Vingt-sept terrassiers et manœuvres étaient employés à l'abatage et au roulement des wagonnets de déblais jusqu'à la locomotive électrique, c'est-à-dire sur une longueur de 50 m. en moyenne.

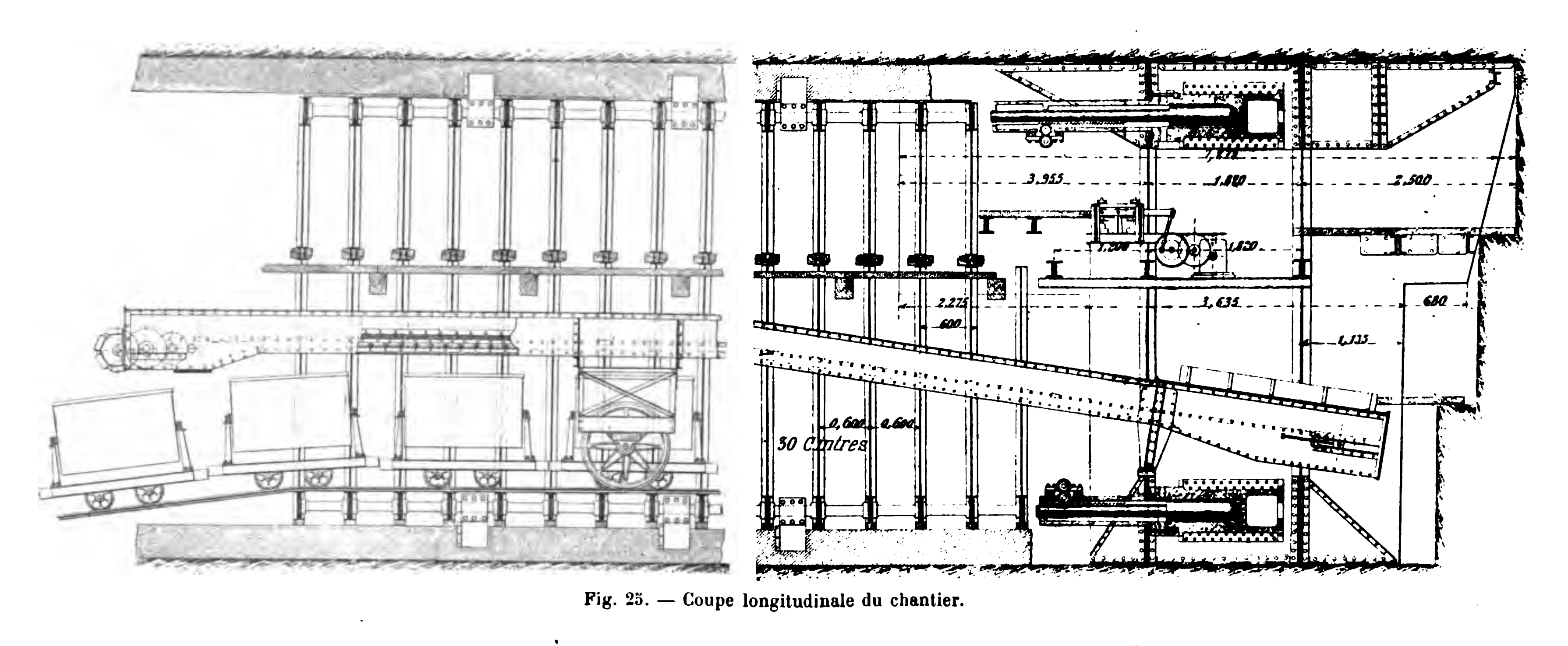


Fig. 25. — Coupe longitudinale du chantier.

Vingt hommes composaient l'atelier de maçonnerie ; six, deux par anneau de 0,60 m., travaillaient directement, de face au revêtement ; les quatorze autres étaient occupés au gâchage du mortier et à l'approche des matériaux.

Revêtement. — Le revêtement était exécuté en meulière avec mortier en ciment de Portland dosé à 350 kg. de ciment par mètre cube de sable.



Fig. 26. — Chargement des wagons par le transporteur.

Organisation du chantier ; installations électriques. — Le service d'extraction des déblais s'effectuait par une locomotive électrique dont la dynamo consommait 18 ampères sous une tension de 440 volts.

La prise de courant s'effectuait sur deux fils aériens par un petit chariot à deux essieux remorqué au moyen d'un conducteur souple. Ce mode de liaison s'accommode beaucoup mieux aux brusques variations de hauteur du tracteur que la liaison rigide ordinaire par une perche à galet et ressort.

A la dynamo des pompes des vérins consommant 4 ampères et à celle du transporteur consommant 13 ampères, il faut ajouter celle d'un ventilateur absorbant 4 ampères.



Fig. 27. — Rampe d'accès au plancher des maçons.

Par journée de travail il fallait compter :

Dynamo des pompes	9 786	watts
» du transporteur	106 080	
» ventilateur	44 064	
» tracteur	132 192	
Total	292 122	watts

L'énergie était fournie par le secteur électrique urbain d'éclairage et de force à raison de 0,40 fr. le kilowatt.

D'après M. l'ingénieur en chef Legouëz, pour un avancement moyen de 3,20 m. correspondant à cinq courses et un tiers, la dépense pouvait être évaluée à 120 fr., soit 37,50 fr. par mètre courant.

Montage et essais. — Le montage commença le 9 mars 1896 au fond d'une fouille blindée de 10 m. de côté ; à la fin de mars il était terminé et le 2 avril le bouclier faisait sa première course. Le 6 il avait déjà parcouru 7,20 m., le 13, 19,20 m. et le 20, 31,80 m.

Terrains rencontrés, assainissement. — Au départ, il s'avança dans le calcaire de Saint-Ouen ; il traversa ensuite des marnes et à partir de la rue Chalabre des sables verts fins fortement agglomérés. Il resta longtemps dans le sable bleu et les sables gris mouillés. Sous la rue de Clichy il rencontra le calcaire grossier, des marnes, des sables gris et enfin des terrains d'alluvions.

Comme on était parti du point bas de l'ouvrage, l'assainissement était aisé ; sous le radier on ménageait une goulotte boisée de 0,40 m. de longueur et 0,25 m. de hauteur qui conduisait les eaux à un puisard creusé sous le boulevard Berthier ; trois pompes rotatives système Dumont, de 0,15 m. de diamètre étaient installées en ce point ; elles pouvaient débiter chacune 90 m^3 à l'heure ; en général une seule suffisait largement aux épuisements, hors le cas d'orage. La machine motrice était une dynamo Sauterre et Harley de 12 chev. de force.

Dans les terrains fluents ou les sables mouvants on blindait le front d'attaque par des cadres et des panneaux et on effectuait le déblai par sections réduites. D'ailleurs sous l'enveloppe une cornière permettait l'enfilage longitudinal de palplanches, pour éviter les glissements et les éboulements. Quand le bouclier avançait, les palplanches butées dans le sol reprenaient naturellement leur position sous l'enveloppe, prêtes à resservir.

Incidents, changement de type. — Tous les 100 m. il fallait arrêter le chantier pour effectuer le démontage et le report de la rampe d'accès au plancher supérieur :

Il y eut au début en juin et en juillet 1896 des causes d'arrêt beaucoup plus fréquentes dans la rupture des vérins en fonte : on dut les enlever et les remplacer par des verins en acier : le chantier fut de ce chef suspendu plus de 15 jours ; il ne reprit sa marche régulière que le 23 juillet.

En décembre de la même année la tôle d'arrière s'affaissa sensiblement sous la charge du sable humide qu'on traversait ; il fallait la réparer pour assurer à la calotte son épaisseur normale ; on fit en partant de l'avant-bec une galerie longitudinale sur l'axe du bouclier jusqu'à l'arrière (fig. 28) ; par une seconde galerie transversale on déposa la tôle et on la fit sortir ; on la replaça après redressement. Il avait d'ailleurs suffi de découvrir l'arrière-bec pour qu'il se relevât de lui-même de 10 cm. ; on combla les deux galeries avec du béton.

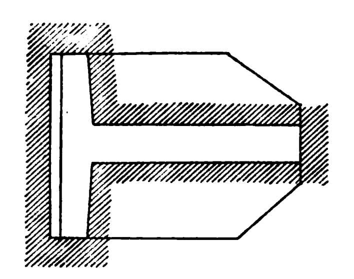


Fig. 28. — Réparation de la tôle d'arrière.

Le bouclier était parti, nous l'avons dit, avec sept vérins seulement ; ce fut à ce moment qu'on posa sur l'axe vertical, en haut le huitième vérin.

En octobre de l'année 1898 le bouclier avait parcouru 1 667 m. et achevé la longueur totale à grande section ; il avait été construit pour pouvoir percer aussi la section réduite ; il suffisait de déposer la tôle à la partie supérieure et à la partie inférieure sur un mètre de large, de supprimer la portion correspondante des deux poutres elliptiques de support, de rapprocher les deux morceaux d'armature et de les remonter.

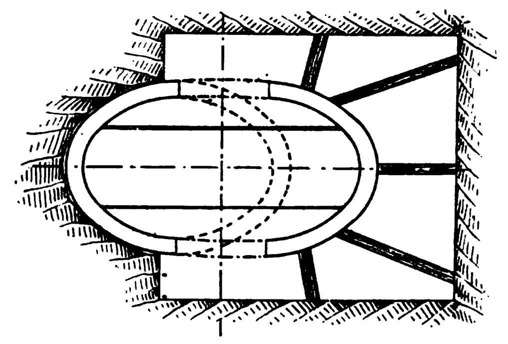


Fig. 29. — Modification du bouclier.

Cette opération délicate s'effectua du 12 octobre au 17 novembre avec un plein succès. On creusa une grande chambre autour d'une moitié seulement de l'engin (fig. 21) ; laissant l'autre moitié fixe encastrée dans le sol, on ripa la première contre elle, et on rétablit les rivures et les assemblages. Pour empêcher le déversement ou l'affaissement on avait supporté le bouclier par des vérins à vis ; en haut et en bas, entre les deux fragments à réunir on avait placé des tendeurs à vis.

c'est avec ces tendeurs qu'on effectua le ripage ; l'opération ne dura que huit heures, de dix heures du matin à six heures du soir ; elle se fit en cinq fractions de 22 cm.

Pendant tout ce travail le bouclier ne baissa que de 0,135 m.; ses dimensions nouvelles furent : 5,77 m. de hauteur, 6,12 m. de largeur, alors que ses dimensions anciennes étaient : 5,92 m. en hauteur et 7,278 m. en largeur.

La première course s'effectua sans incident mais peu à près on observa de notables déformations des poutres principales.

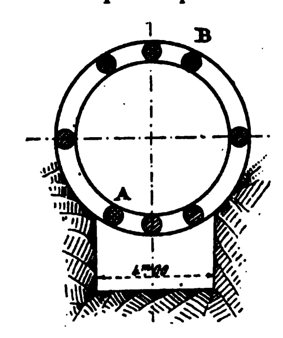


Fig. 30. — Vérins hors service.

Le vérin inférieur de gauche A (fig. 30) ayant été paralysé par des fuites, on n'utilisait pas le vérin supérieur de droite B, par symétrie pour ne pas déverser l'appareil ; mais avec six vérins seulement, la pression monta jusqu'à 200 kg. par centimètre carré : le bouclier ne tarda pas à se disloquer. Lors du changement de type, d'ailleurs, on n'avait pas amené les trous de rivure à une coïncidence parfaite ; pour ne pas procéder à l'alésage sur place, difficile à effectuer, on s'était borné à mettre de plus petits rivets qui bientôt jouèrent dans leur logement.

Le 22 décembre, la nécessité d'une réparation sérieuse s'imposa : la poutre maîtresse d'avant était tordue, celle d'arrière avait l'âme brisée ; par suite de leur affaissement sur elles-mêmes, la largeur de l'enveloppe était de 6,18 m. On ouvrit une fouille de 4 m. de largeur à la partie inférieure sous le bouclier et on remit le tout en état ; la tranchée fut ensuite bourrée avec du béton.

Vitesses. — Le diagramme ci-dessous (fig. 31) donne l'avancement du travail ; les arrêts dans la marche correspondent soit à des fêtes, soit aux incidents que nous venons de signaler.

La vitesse moyenne journalière fut de 3,20 m., déduction faite des repos et arrêts ; la vitesse maxima atteignit 6 m. Du 2 avril 1896 au 29 août 1898 soit pendant 870 jours le bou-

clier parcourut 2 481,20 m., la vitesse moyenne générale s'élève donc à 2,85 m.

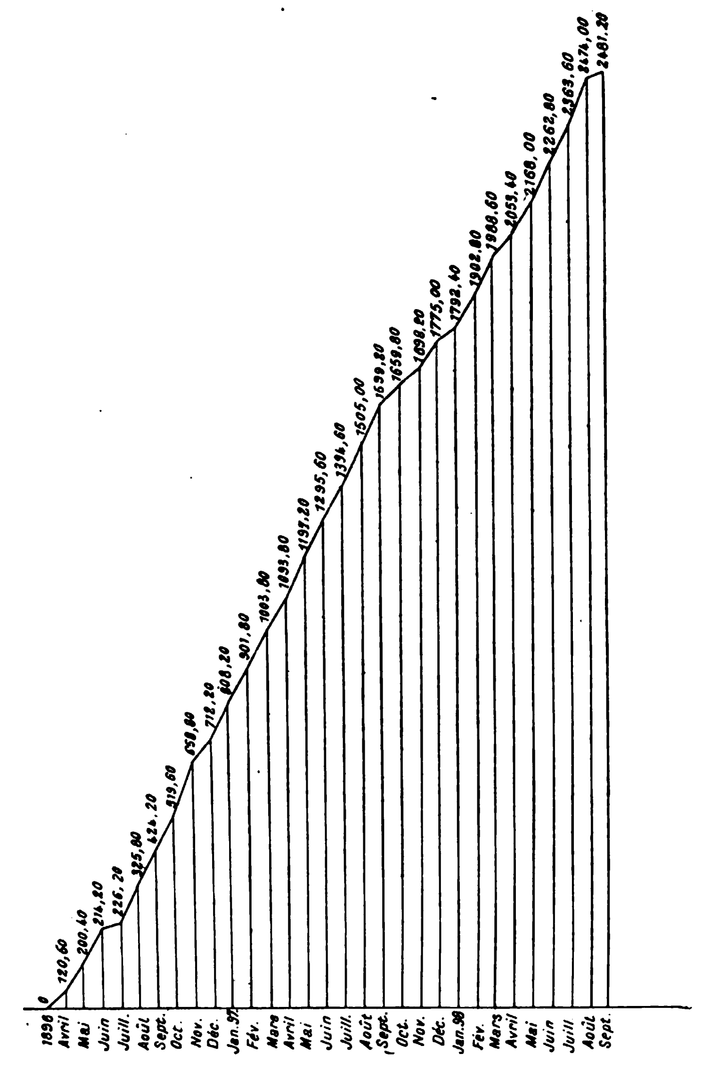


Fig. 31. — Diagramme de marche du bouclier.

Conclusion. — Comparé au procédé employé dans la partie extra muros, le système de percement que nous venons de décrire paraît de beaucoup supérieur. Il permettait en effet d'ouvrir la section entière du souterrain et d'établir le revêtement complet

en maçonnerie directement à l'abri de l'armature sans emploi de boisage ni de blindage.

Il n'était pas moins différent des autres procédés par bouclier plus anciennement mis en œuvre, puisque tout en assurant une grande sécurité il supprimait l'usage d'anneaux métalliques.

Par la grande surface d'appui de l'appareil, par la construction simultanée de tout le revêtement on espérait ne produire aucun tassement ; il faut reconnaître que le succès fut, sous ce rapport, complet : il n'y eut aucune dislocation de chaussée, aucun arrêt dans la circulation, et c'est à peine si les Parisiens s'aperçurent du travail qui se poursuivait sous leurs pieds. Entre la place Clichy et la place de la Trinité un égout sous lequel on passait fut en partie disloqué ; mais il était vieux et déjà peu solide.

En ce qui concerne non plus la méthode, mais l'engin lui-même, il y a plusieurs réserves à faire. C'était un progrès sensible que d'avoir supprimé la poutre mobile employée à Clichy extra-muros et de réaliser directement l'appui sur les cintres : par l'indépendance des vérins on pouvait plus facilement conduire le bouclier et le ramener sur l'axe quand il avait tendance à s'en écarter soit en plan, soit en hauteur. Mais l'appui était malgré les ancrages insuffisant : des cintres reculèrent sous l'effort des presses, et se faussèrent ; avec une telle fatigue, l'entretien était coûteux.

Ceci tient en partie à ce que l'effort total n'était pas assez régulièrement réparti sur la section entière ; les 12 vérins primitivement prévus auraient dû être montés : or il n'y en eut jamais que huit.

Les poutres elliptiques quoique très hautes et fort encombrantes n'étaient pas assez rigides ; dans le sable humide, sous la charge des terrains ébranlés, elles s'aplatissaient : les pièces de bois verticales qu'on plaça entre les planchers pour obvier à ce défaut étaient d'une grande gêne pour l'accès et la circulation.

Enfin le bouclier manquait un peu d'équilibre ; on avait placé la machinerie hors de l'axe, sur la droite, pour ne pas obstruer la section ; l'appareil avait une tendance continuelle à se déver-

ser de ce côté en tournant autour de son axe ; on s'opposa à ce mouvement en chargeant le plancher à gauche avec des gueuses de fonte. On réglait d'ailleurs continuellement ce contrepoids, c'est-à-dire qu'on l'augmentait ou le diminuait suivant que le bouclier s'inclinait à droite ou à gauche.

CHAPITRE II

SIPHON DE L'OISE

EXTENSION DES IRRIGATIONS A L'EAU D'ÉGOUT VERS MÉRY ET TRIEL

Exposé. — Les travaux d'extension des irrigations à l'eau d'égout vers Méry et Triel donnèrent lieu à une application intéressante de la méthode du bouclier.

Dans son ensemble le projet comportait la création :

1° D'un puits vertical de 25 m. de profondeur et de 2 m. de diamètre ;

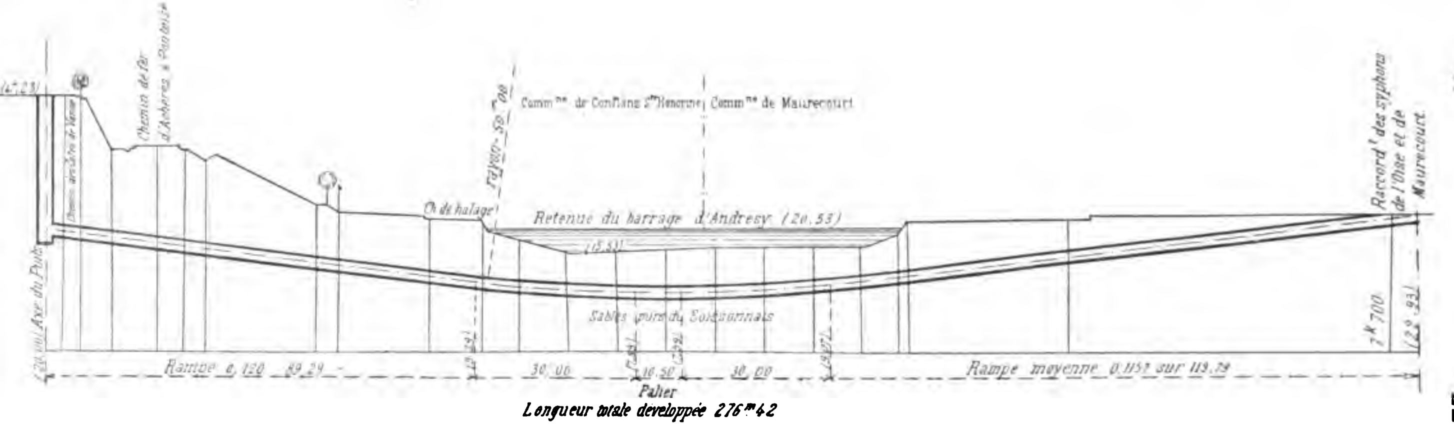
2° D'une galerie de même diamètre et de 280 m. de longueur qui partie de la base du puits devait passer sous la rivière d'Oise à 15 m. environ sous la nappe d'eau et venir déboucher sur l'autre rive à 100 m. de la berge sur le territoire de la commune de Maurecourt ;

3° D'une conduite en fonte frettée de 1000 m. de longueur faisant suite à la galerie et conduisant les eaux jusqu'au point où par une deuxième galerie elles ont un libre écoulement sous la montagne d'Hautié.

Nous ne parlerons ici que de l'exécution avec le bouclier de la première galerie de 2 m. de diamètre ; nous ne dirons que peu de chose du puits et rien de la conduite en fonte.

Profil en long. — L'axe du puits est placé sur la rive gauche de la rivière au point Hm. 74 + 25,00 du tracé de l'émissaire général, son seuil est à la cote (47,92) et il descend à la cote (20,00), il a donc une hauteur de 27,92 m.

De ce point part la galerie (fig. 32 et 33), elle s'enfonce sous la nappe d'eau par une pente de 12 cm. par mètre sur 89,29 m.,



Longueur totale développée $276^{m}42$

Fig. 32. — Profil en long du siphon.

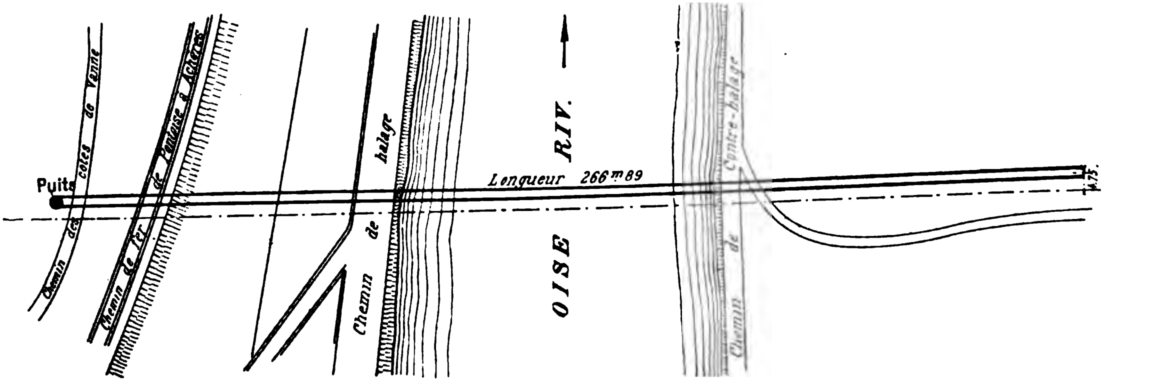


Fig. 33. — Plan du siphon.

puis par une courbe de 200 m. de rayon sur 30 m. de longueur (le point le plus bas de l'axe est à la cote 7,59) ; après un palier de 10,50 m. de longueur le siphon remonte par une courbe de 200 m. de rayon sur 30 m., puis par une rampe moyenne de 0,1157 m. sur 119,79 m. il se raccorde au siphon de Maurecourt au point Hm. 76 + 99, 20, à la cote (22,93); la longueur en projection est de 274,20 m., la longueur développée de 276,42 m.

Le niveau de retenue du barrage d'Andrésy est à la cote (20,53), le point le plus bas du lit à la cote (15,53); la galerie ne descend donc pas à plus de 13,94 m. du niveau de la nappe d'eau, et sous le lit même elle n'est qu'à 9 m. ou 10 m. de profondeur souterraine.

Les travaux furent adjugés le 17 février 1897 à M. Denize avec un rabais de 17 p. 100 sur les prix du devis.

Section transversale. — La galerie est circulaire ; elle présente une section libre de 2 m. de diamètre ; le revêtement est en maçonnerie de béton de 25 cm d'épaisseur (y compris un enduit intérieur de 10 mm.) enfermée dans une enveloppe d'acier de 5 mm. d'épaisseur; pour protéger cette tôle contre l'oxydation on l'a recouverte extérieurement d'une chape en ciment de Portland de 5 cm d'épaisseur au moins. L'épaisseur minima de ce revêtement mixte est ainsi de 305 mm.

Bouclier. — Le bouclier (fig. 34, 35 et 36) était disposé pour l'emploi ininterrompu de l'air comprimé. Il se composait d'une tôle de 14 mm. d'épaisseur enroulée en un cylindre de 2,63 m. de diamètre et soutenue par deux poutres maîtresses circulaires distantes de 1,995 m.

Ces poutres avaient 0,40 m. de hauteur, elles étaient formées d'un fer plat de 400×14 mm. et de cornières de $\frac{100 \times 100}{14}$; douze entretoises longitudinales constituées par un fer plat de 10 mm. d'épaisseur et deux ou quatre cornières de $\frac{80 \times 80}{9}$ les reliaient sur toute leur hauteur.

Le bouclier se trouvait ainsi divisé en trois parties :

1° L'avant-bec ou chambre de travail de 993 cm. de longueur, en tôle de 18 mm. d'épaisseur, renforcée à son talon par une

deuxième tôle de 14 mm. et soutenue jusqu'à son extrémité par douze consoles en acier moulé ;

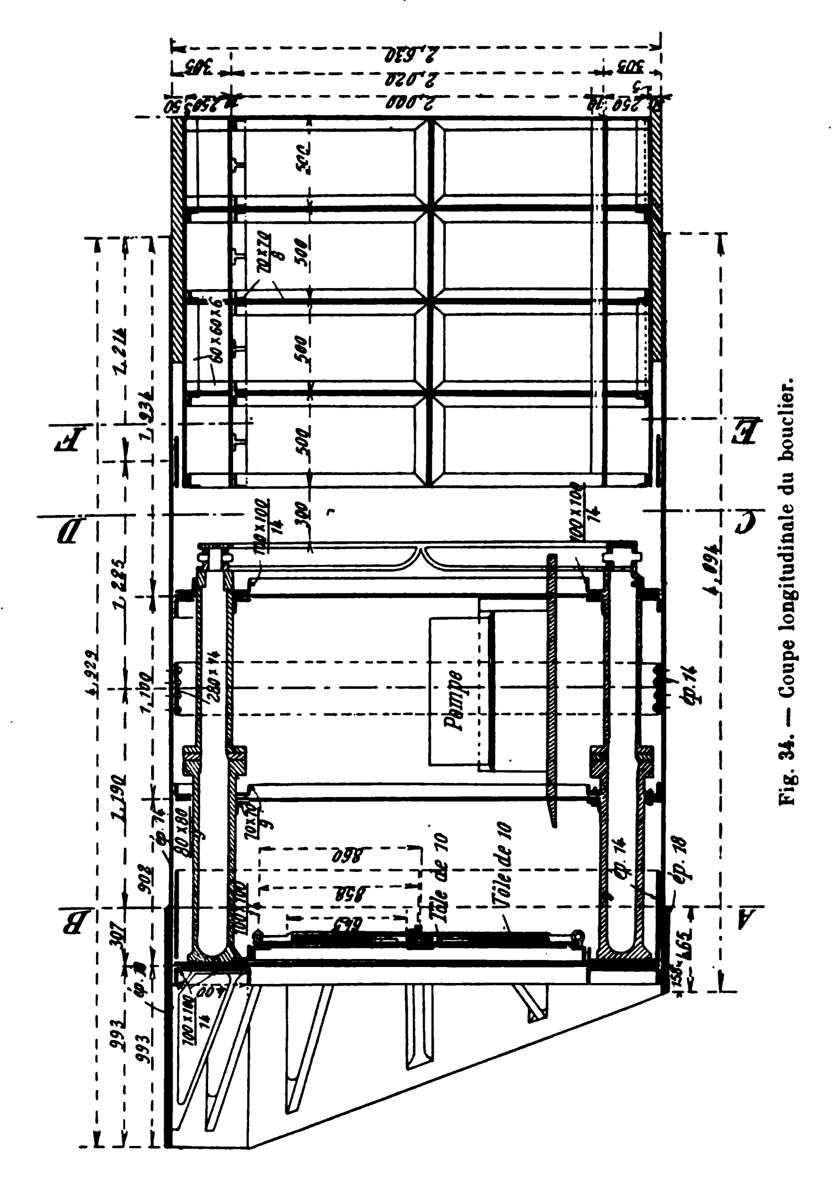


Fig. 34. — Coupe longitudinale du bouclier.

2° Le corps même de 2,002 m. de longueur séparé de la chambre de travail par une cloison percée d'une porte à deux vantaux ;

3° La queue de 1,934 m. de longueur, à l'abri de laquelle s'effectuait le revêtement mixte, métal et maçonnerie.

La tôle d'avant-bec était découpée en visière, alors que la longueur totale de l'engin était de 4,929 m. sur sa génératrice

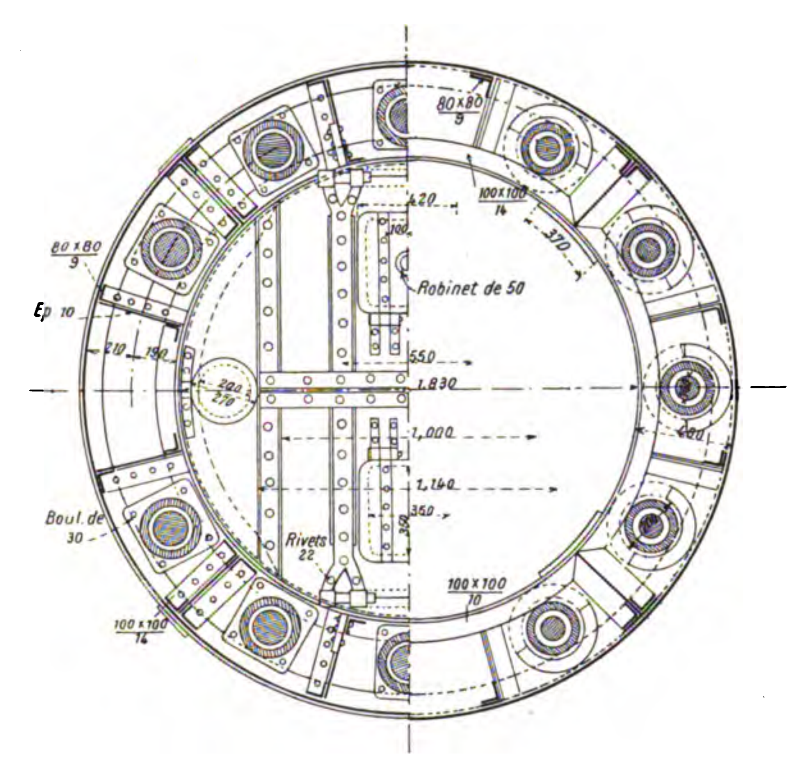


Fig. 35. — Bouclier. Demi-coupe AB. Demi-coupe CD.

supérieure, elle n'était que de 4,094 m. sur la génératrice inférieure.

Les douze entretoises longitudinales étaient reliées en leur milieu par un diaphragme qui servait à soutenir les vérins.

Vérins. — Les vérins au nombre de dix traversaient la poutre circulaire d'arrière ; ils étaient logés dans les caissons formés par les entretoises longitudinales et les poutres et boulonnés à la poutre circulaire d'avant ; seuls les deux caissons placés aux deux extrémités du diamètre horizontal restaient vides.

Les pistons à double effet avaient 0,15 m. de diamètre ; leur course était de 0,50 m. ; la pression pouvait atteindre 220 kg. par centimètre carré, soit 49,5 t. par vérin ou 495 t. pour l'ensemble ; mais au cours du travail on dépassa rarement 80 kg. par centimètre carré soit 180 t. d'effort total : le frottement variait en

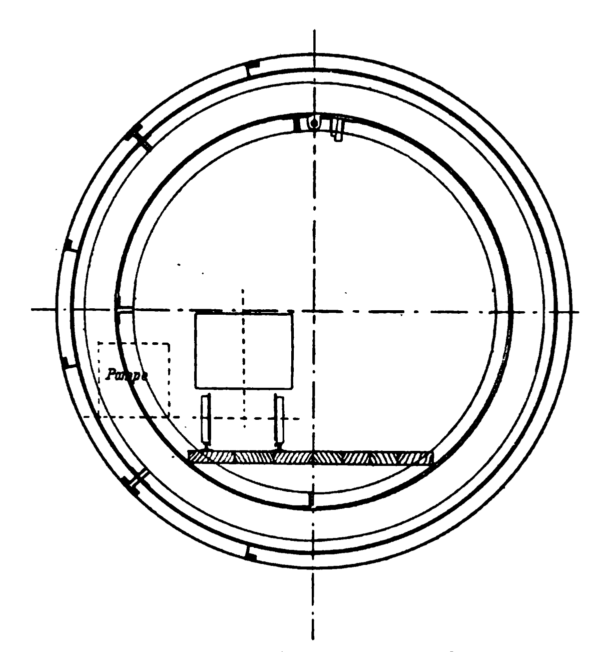


Fig. 36. — Bouclier. Demi-coupe EF.

effet le plus souvent entre 1 800 kg. et 3 000 kg. par mètre carré d'enveloppe.

Tous les vérins étaient indépendants les uns des autres; leurs têtes portaient des segments circulaires qui s'engageaient entre les cintres et la queue du bouclier pour prendre appui sur le béton.

Sas. — Le sas placé à l'origine de la galerie était formé d'un cylindre en tôle d'acier de 10 mm. d'épaisseur (fig. 37 et 38) ; il avait 2 m. de diamètre et 3 m. de longueur ; il était séparé de la galerie par une porte de 0,90 m. de hauteur et 0,70 m. de largeur fermée par une goupille à l'intérieur du sas afin d'éviter les graves accidents qu'aurait entraînés une brusque ouverture intem-

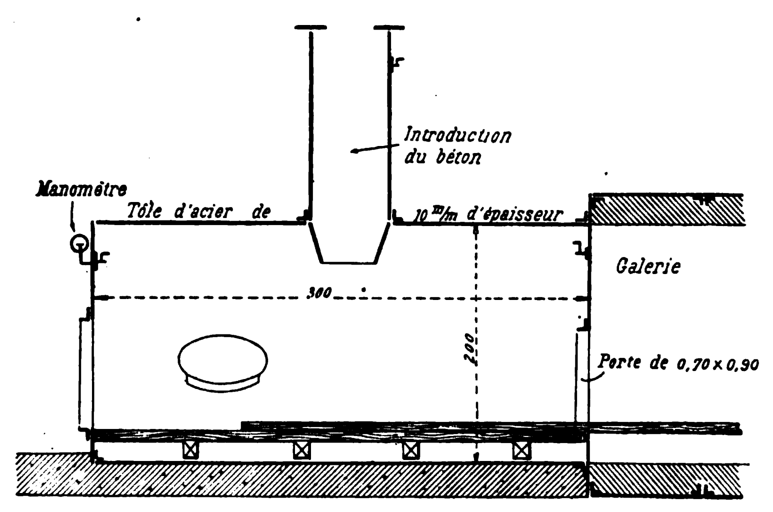


Fig. 37. — Coupe longitudinale du sas.

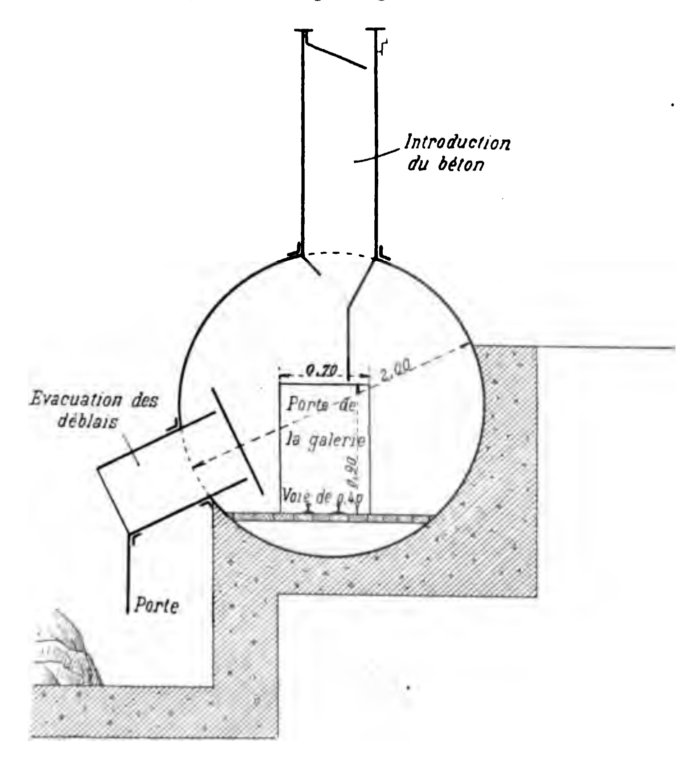


Fig. 38. — Coupe transversale du sas.

pestive de l'extérieur ; il communiquait avec l'extérieur par une

porte analogue, par une écluse à béton verticale et par une pipe inclinée pour l'évacuation des déblais.

L'ouverture du robinet qui mettait le sas en communication avec l'atmosphère était réglée par un diaphragme; de cette façon la durée de l'éclusée était subordonnée à la pression intérieure, il n'y avait pas à craindre de décompression brusque.

Le temps des éclusées suivant les différentes valeurs de la pression était celui-ci : jusqu'à 0,50 kg., 3 min. ; jusqu'à 1 kg., 5 min. ; jusqu'à 1,50 kg., 7 min. ; jusqu'à 1,80 kg., 8 à 10 min.

Un robinet mettait en communication le sas et la galerie ; un manomètre extérieur indiquait à chaque instant la valeur de la pression.

Enveloppe métallique. — Le revêtement métallique (fig. 39 et 40) était formé par des anneaux d'acier de 5 mm. d'épaisseur et 0,50 m.

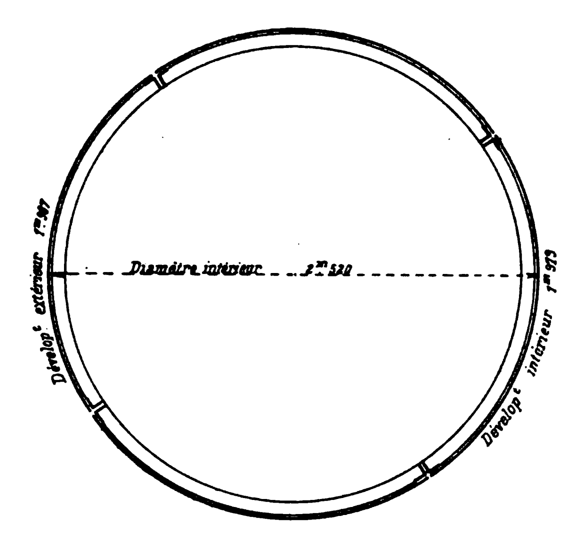


Fig. 39. — Coupe transversale du revêtement métallique.

de longueur divisés en 4 segments égaux ; l'assemblage se faisait à joints recoupés par des cornières d'acier de $\frac{60 \times 60}{6}$ préalablement rivées aux tôles ; on les réunissait par 192 boulons dont 40 suivant les 4 génératrices des segments.

Pour assurer l'étanchéité et éviter les pertes d'air, dans tous les

joints des segments et des anneaux on interposait une feuille de feutre.

L'épaisseur de la tôle avait été calculée en fonction des pressions hydrostatiques à supporter ; la cote du plan d'eau de la retenue au barrage d'Andrésy est de (20,53 m.) ; celle du plan

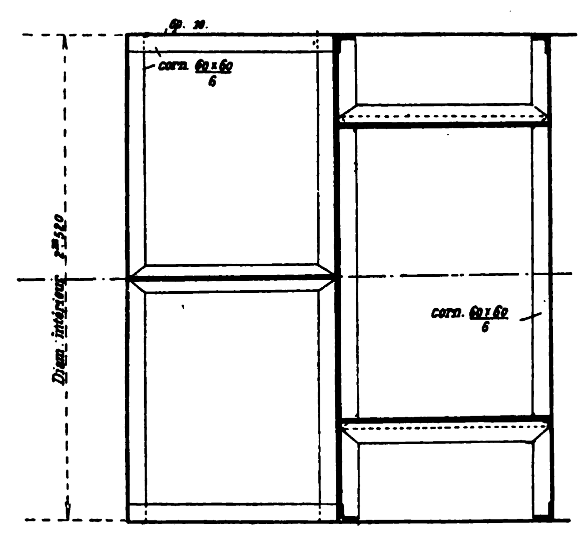


Fig. 40. — Coupe longitudinale du revêtement métallique.

d'eau normal à l'amont de l'aqueduc est de (49,42) m. d'où une différence de niveau de 28,89 m.

La formule connue $e = \frac{HD}{2R}$ où e représente l'épaisseur de l'armature, H la hauteur d'eau en mètres (28.89 m.), D le diamètre intérieur du siphon en mètres (2,00 m.), et R le travail limite de l'acier (8 kg.), donne dans ces conditions e = 3,6 mm. On prit 5 mm. pour se mettre à l'abri des dangers résultant des oxydations et des corrosions.

Entre l'armature et la tôle du bouclier on laissait 5 cm. de jeu pour l'exécution d'une chemise de protection en mortier de ciment ; des guides métalliques assuraient le réglage de cet intervalle.

Cintres. — Le béton était comprimé entre l'armature et des cintres annulaires de 0,50 m. de longueur et 2 m. de diamètre

intérieur en tôle de 10 mm. d'épaisseur (fig. 41 et 42) : l'épaisseur de la tôle correspondait ainsi à celle de la chape intérieure.

Les cintres étaient en 4 segments plus un claveau assemblés par des cornières de $\frac{70 \times 70}{8}$ rivées sur la tôle et boulonnées entre

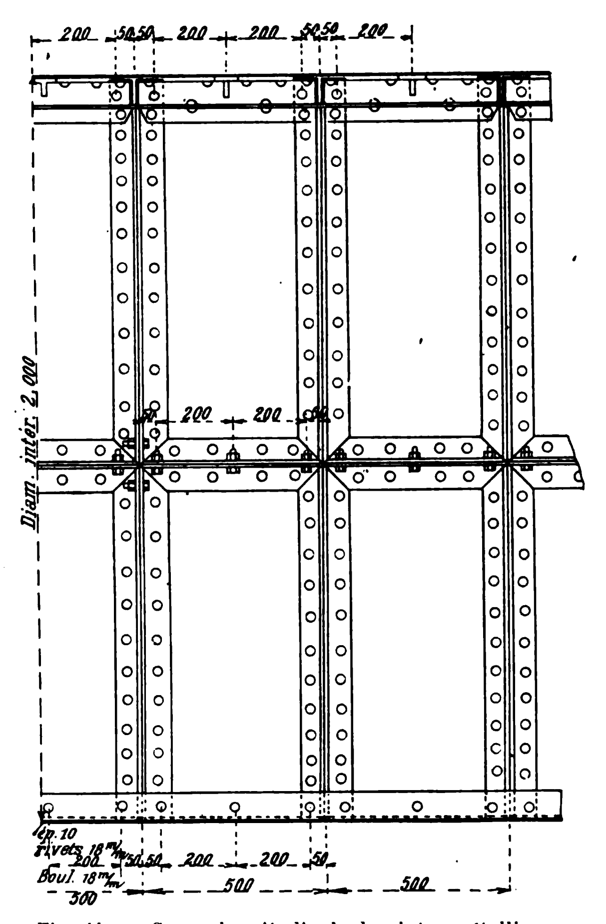


Fig. 41. — Coupe longitudinale du cintre métallique.

elles. On opérait le réglage ou le décintrement au moyen de deux coins de bois de 44 mm. d'épaisseur recouverts de tôle.

Ils étaient au nombre de dix représentant une longueur de 5 m. ; on les reportait successivement de l'arrière à l'avant, à mesure qu'on progressait.

Installations accessoires. — Les déblais étaient chargés dans

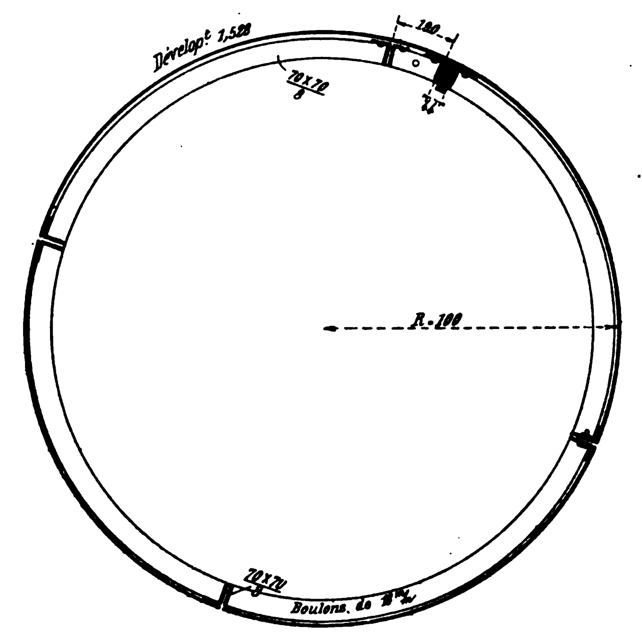
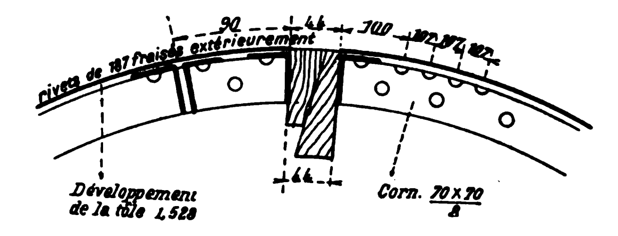


Fig. 42. — Coupe transversale du cintre métallique.



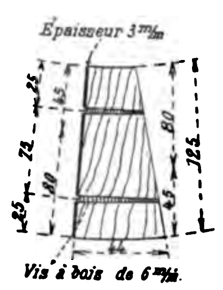


Fig. 43. — Détails d'un coin de décintrement.

des wagonnets Decauville de 200 l. de capacité ; la traction s'ef-

fectuait par un câble métallique traversant le sas dans des presse-étoupes et venant s'enrouler sur un treuil actionné par une dynamo. Au point bas de la galerie, pour empêcher le câble de frotter contre la voûte, ce qui l'aurait rapidement usé, on le faisait passer sous un tambour fixé à la partie inférieure de la section.

La voie de roulement avait 0,40 m. de largeur, elle était posée sur un petit plancher installé sur le radier de la galerie.

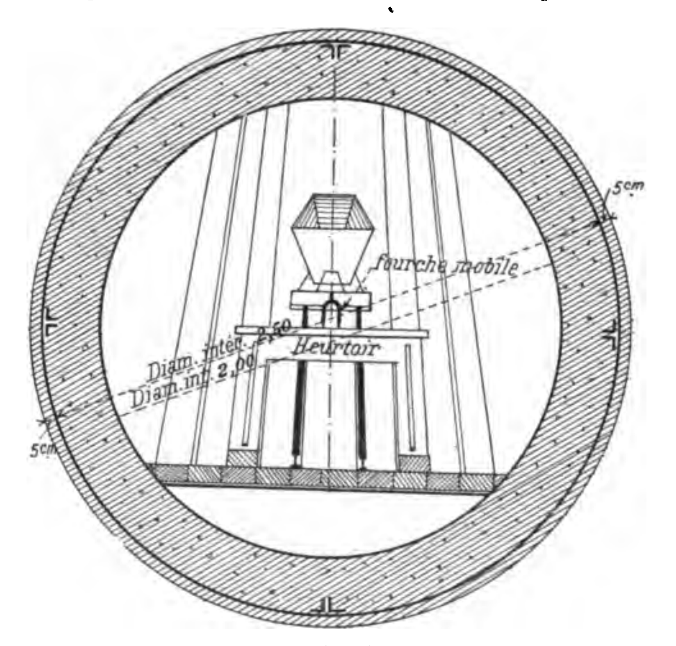


Fig. 44. — Vue perspective du dispositif de sûreté.

Pour éviter la manutention des matériaux par le puits vertical, on avait commencé le travail par l'aval du siphon et organisé les chantiers sur la rive droite de l'Oise ; c'est donc une rampe de 0,12 m. que les déblais devaient remonter ; un ingénieux dispositif de sûreté (fig. 44) empêchait les wagons de descendre et de venir heurter le bouclier au cas de rupture accidentelle du câble. Tous les 20 m. on plaçait sur la voie un heurtoir mobile formé de taquets et d'une traverse articulée à une extrémité ; de plus chaque wagonnet portait à l'arrière une fourche montée sur un axe horizontal et plus longue que la distance de

son point d'articulation au plancher ; dans la marche avant la fourche, inclinée, glissait sans obstacle sur les madriers, mais dans la marche arrière ses pointes s'implantant brusquement dans le bois faisaient dérailler le wagonnet.

Quand on eut dépassé le point bas pour gagner le puits, une poulie de retour fut placée à l'avant du bouclier, elle servait à retenir les wagons de déblais à la descente et à monter jusqu'au point d'emploi les anneaux métalliques du cintre et de l'armature et le béton du revêtement.

Fonctionnement du bouclier. — Les ouvriers placés dans l'avant-bec procédaient à l'abatage des déblais qu'ils chargeaient à mesure dans les wagonnets. Pendant ce temps on démontait le dernier anneau d'arrière du cintre et on l'assemblait à l'avant tout en boulonnant une virole de 1 m. de longueur de l'enveloppe extérieure à la suite de celles déjà en place et bétonnées. On remplissait de béton l'espace annulaire de 0,50 m. de profondeur ainsi constitué , et on mettait les presses en marche ; elles commençaient par serrer le béton entre les deux enveloppes en l'obligeant à remplir tout l'espace libre, puis, le tassement achevé, elles produisaient l'avancement du bouclier ; on démontait alors à l'arrière un deuxième anneau de cintre qu'on mettait en place en tête : on remplissait de béton le nouvel espace annulaire de 0,50 m. et s'y appuyant comme précédemment on achevait la course de 1 m. Puis on procédait au deblaiement du front de la galerie et ainsi de suite.

Dans les terrains sableux on évitait les glissements en établissant sur le front d'attaque un masque en planches maintenues par des couchis étrésillonnés contre la poutre circulaire d'avant ; on boisait de même les flancs ; pour éviter les déperditions d'air on bourrait fortement d'argile tous les joints.

Dans les graviers et les terres ébouleuses on prolongeait en outre l'avant-bec par un ciel mobile ; sous l'enveloppe on faisait glisser des plaques en tôle et on les enfonçait dans le terrain à mesure qu'on leur creusait un logement au moyen de fiches en fer. On réalisait de la sorte une enveloppe jointive auxiliaire limitant les éboulements possibles ; sous son abri on retirait

une ou plusieurs des planches du masque et on procédait à l'abatage, rapidement; quand la fouille avait 0,50 m. de profondeur on blindait son talus par les planches correspondantes; puis on étendait la cavité de proche en proche à toute la section ; l'avancement du bouclier ainsi préparé, on mettait la pression sur les vérins : l'engin progressait et à la fin de la course le ciel mobile rentré sous l'enveloppe était prêt à resservir.

En général il suffisait de garnir les boisages d'argile pour éviter de grandes pertes d'air ; si malgré cette précaution la pression baissait trop, on formait le masque de planches très étroites, n'effectuant le déblai, dans l'opération de report du blindage, que par sections excessivement réduites.

Exécution des maçonneries. — Dès qu'un anneau métallique était posé et monté on commençait à maçonner ; le revêtement

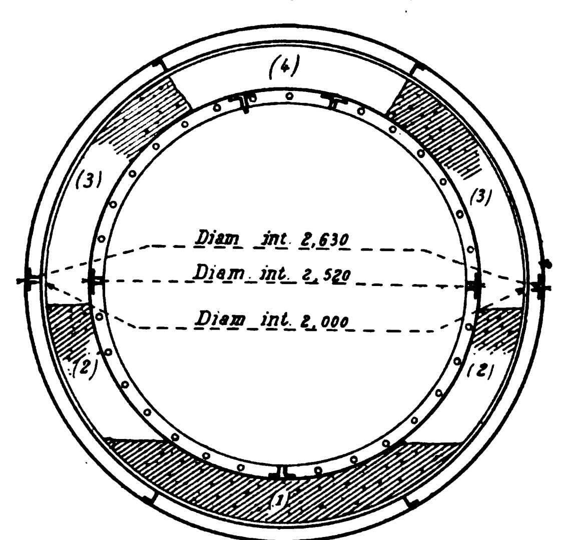


Fig. 45. — Exécution de la maçonnerie.

entier s'établissait en 4 phases correspondant au radier, aux piédroits, aux retombées et à la clef (fig. 45).

Le radier était bétonné sur 0,40 m. de hauteur environ suivant le profil intérieur donné par une cerce.

On posait ensuite et on boulonnait les deux segments inférieurs du cintre en les maintenant à la distance convenable de l'enve-

loppe ; dans l'intervalle on coulait le béton qu'on élevait jusqu'à hauteur des naissances en le retenant à l'avant par des pièces de bois convenablement taillées et placées dans la couronne annulaire au fur et à mesure des besoins ; on maintenait ces pièces en place au moyen de chandelles engagées contre la poutre arrière du bouclier.

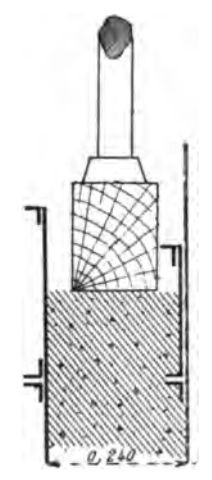


Fig. 46. — Compression du béton.

Au moment de la course, les tiges des vérins venaient remplacer ces butons et exercer la compression (fig. 46).

On montait enfin les deux segments supérieurs et le claveau qu'on serrait par ses coins ; on continuait le coulage du béton et on l'achevait par le haut en bourrant soigneusement avec des battes en bois.

Le revêtement extérieur était placé à mesure qu'avançait l'engin ; le maçon armé de sa truelle prenait le mortier dans sa main gauche et comblait le vide laissé entre l'ar-

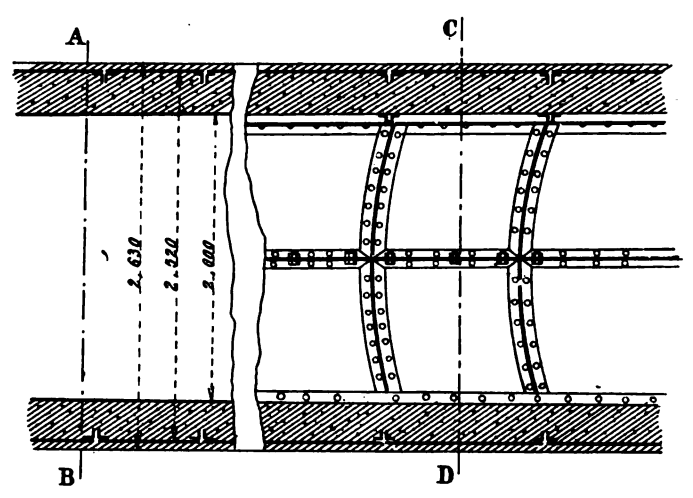


Fig. 47. — Coupe longitudinale du revêtement.

mature et le bouclier. Cette opération était rendue très aisée par l'excès de la pression intérieure sur la pression extérieure ; souvent même le mortier était violemment chassé dans l'intervalle dont il remplissait tous les vides.

Après décintrement (fig. 47, 48 et 49) l'enduit de 1 cm. d'épais-

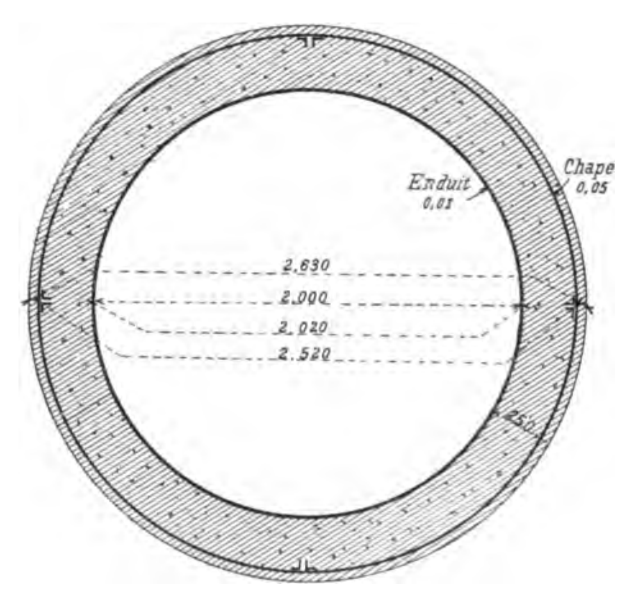


Fig. 48. — Coupe transversale suivant AB.

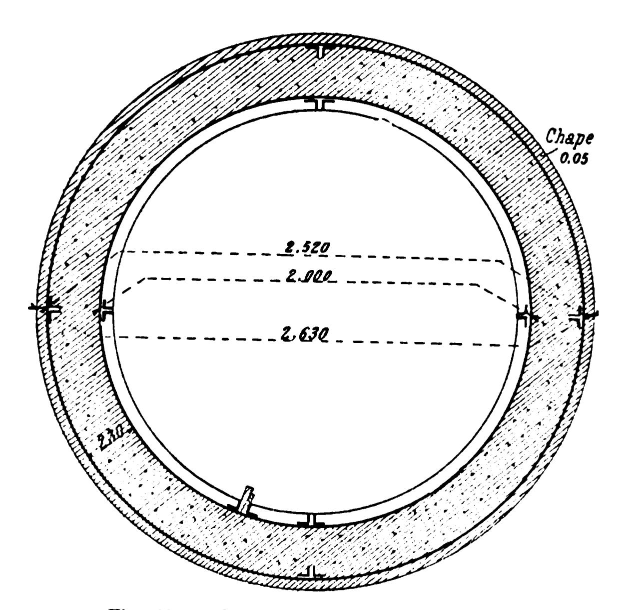


Fig. 49. — Coupe transversale suivant CD.

seur était appliqué sur toute la section, jusqu'au niveau du plan-

cher ; plus tard, on l'étendit au radier par portions de 4 à 5 m. de longueur.

Maçonneries. — Toutes les maçonneries étaient en mortier de ciment de Portland de la marque Candlot, mais le dosage différait suivant qu'il s'agissait du revêtement intérieur, du revêtement extérieur ou de la chape.

Voici quels étaient ces dosages :

Revêtement extérieur :

Sable	1 m³
Ciment de Portland	450 kg.

Revêtement intérieur :

Gravillon	1 partie
Mortier	1 partie

Ce dernier mortier était à 450 kg. de ciment de Portland par mètre cube de sable de rivière.

Chape intérieure :

Sable	1 m³
Ciment	900 kg.

Organisation des chantiers. — Installations mécaniques. — Les chantiers étaient, nous l'avons dit, installés sur la rive droite de l'Oise.

La manœuvre du treuil, la marche du bouclier, l'éclairage de la galerie, la compression de l'air et les épuisements nécessitaient une installation mécanique importante ; le croquis ci-dessous (fig. 50) donnant l'emplacement de chaque appareil, il nous suffira d'indiquer sa nature et sa puissance.

Il y avait trois machines à feu :

1° Une locomobile Laparra, de 25 chevaux, actionnant : un compresseur Roy, une dynamo génératrice de 12 chevaux, débitant 40 ampères sous 220 volts, et deux pompes Noël.

2° Une locomobile demi-fixe de Weyler et Richmond, d'une force de 35 chevaux ; cette locomobile, montée dans le même bâtiment que la première, pouvait, en cas de besoin, la remplacer ; elle actionnait, en travail normal, deux compresseurs

Roy, refoulant l'air dans un réservoir où il perdait son humidité; sur chaque conduite était placé un clapet de retenue.

3° Une locomobile Herman-Lachapelle, de 25 chevaux, actionnant un compresseur Sauterre-Lemonnier et un compresseur Roy; celui-ci n'était pas utilisé, celui-là refoulait directement l'air dans la galerie, en passant par le sas, sans interposition de réservoir [1].

Il y avait donc un compresseur Sauterre et 4 compresseurs

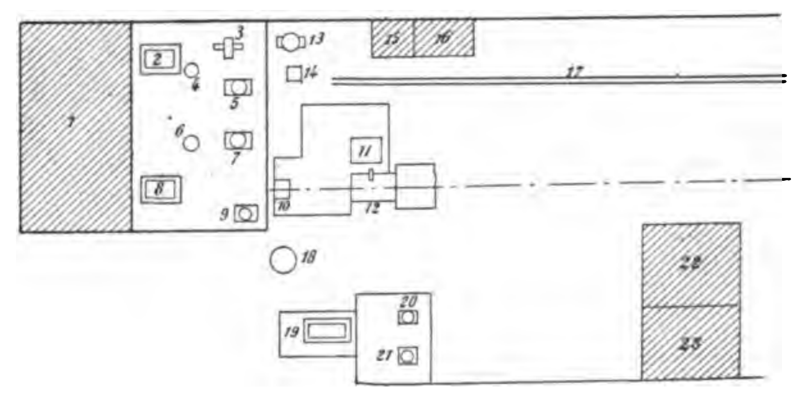


Fig. 50. — Disposition du chantier. Croquis schématique.

1, dépôt de charbon. — 2, locomotive Laparra. — 3, dynamo. — 4, pompe Noël pour l'alimentation — 5, compresseur Roy. — 6, réservoir d'air. — 7, compresseur Roy. — 8, locomotive Weyler et Richmond. — 9, compresseur Roy. — 10, treuil électrique. — 11, fosse des déblais. — 12, sas d'air. — 13, pompe Noël, pour épuisements. — 14, puits. — 15, forge. — 16, magasins. — 17, voie Decauville pour l'évacuation des déblais. — 18, réservoir. — 19, locomotive Herman Lachapelle. — 20, compresseur Sauterre. — 22, bureau de l'Entreprise. — 23, magasin de ciment.

Roy; le premier pouvait donner 15 400 m³ d'air par 24 heures; les autres, tournant à 90 tours par minute, produisaient 10 000 m³ d'air par 24 heures; soit en tout 45 000 m³.

Le treuil électrique était placé en avant du sas; sa dynamo réceptrice avait une puissance de 4 chevaux; la manœuvre s'accomplissait sur les ordres donnés de l'intérieur au moyen de signaux sonores conventionnels.

L'une des pompes Noël avait un diamètre de 0,030 m. Elle aspirait l'eau en rivière et la refoulait dans un réservoir, pour l'alimentation générale du chantier, l'autre avait un diamètre de 0,050 m, elle servait alternativement aux épuisements ou au remplissage du réservoir.

[1] Conséquence fâcheuse, la température s'élevait dans la galerie à 40°.

Les pompes du bouclier étaient actionnées par deux dynamos Hillairet Huguet de 3 chevaux, consommant de 10 à 12 ampères sous 220 volts.

L'éclairage était assuré par des lampes de 16 bougies dépensant ensemble 5 ampères.

Au total l'énergie électrique produite se repartissait ainsi :

Dynamo génératrice		12 chev.
Treuil électrique	4 chev.	
Bouclier	6 chev.	
Eclairage	1,5	
Total	11,5	

Vitesse. — L'appareil fut monté en novembre 1897 et commença à marcher dès la fin du mois; au 1er décembre il avait parcouru 7,62 m.

La vitesse mensuelle varia de 19,75 m. (mars 1898) à 28,75 m.

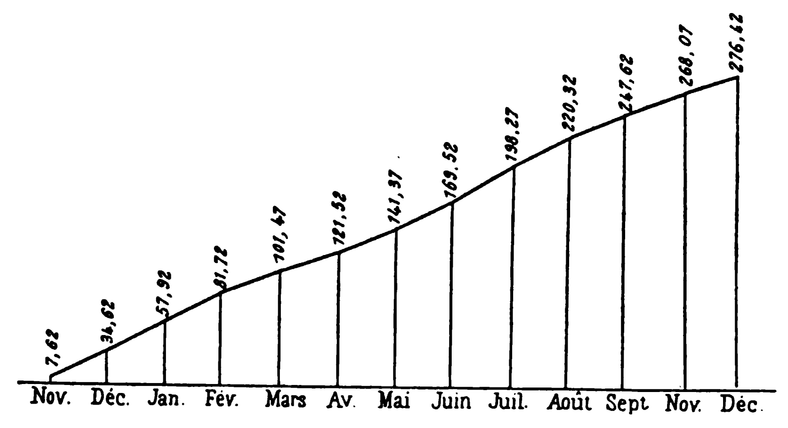


Fig. 51. — Diagramme de marche du bouclier.

(juillet 1898); en moyenne on ne parcourut donc jamais 1 m. par jour, mais seulement 0,80 m.; très souvent on ne faisait qu'une course de 0,50 m.; l'avancement, d'ailleurs, était fort irrégulier. Cette lenteur était la conséquence inévitable de l'exiguïté de la section, du travail dans l'air comprimé et de la nature ébouleuse des terrains.

Le diagramme ci-dessus (fig. 51) résume les différentes phases de l'avancement mensuel.

Terrains rencontrés et épuisements, — On a rencontré surtout des sables jaunes colorés d'oxyde de fer, des sables gris siliceux, des sables verdâtres glauconifères, des sables coquilleux mêlés de gravier et quelques lentilles de calcaire.

Au début, l'eau était peu abondante, on pouvait l'évacuer directement en utilisant la surpression intérieure : il suffisait d'ouvrir un robinet monté sur le sas et mettant en communication avec l'air libre un tuyau dont l'autre extrémité plongeait dans l'eau.

Quand l'enfoncement vertical fut trop considérable pour que cet artifice continuât à réussir, on installa une pompe à bras dans la galerie; cette pompe de 0,030 m. de diamètre, manœuvrée par trois ouvriers, refoulait l'eau à une pompe Noël de 0,050 m. de diamètre placée à l'extérieur.

Incidents. — Nous avons dit que les anneaux cylindriques de l'armature étaient limités par des sections droites; comme on décrivait en profil une courbe à peu près continue, les génératrices inférieures devaient avoir une longueur plus grande que les génératrices supérieures ; aussi intercalait-on dans le joint des deux secteurs inférieurs, outre la feuille de feutre indispensable à l'étanchéité, une rondelle de plomb convenablement amincie ; le même procédé servait à rapprocher de l'axe un anneau de l'armature quand le précédent s'en était écarté.

Les guides qui assuraient l'existence d'un vide de 0,05 m. entre l'enveloppe du bouclier et la tôle de la galerie, étaient un peu trop longs; ils ne laissaient pas au bouclier une indépendance suffisante pour décrire les courbes : on dut les couper.

De plus sous l'effort de ces guides le dernier anneau mis en place fatiguait beaucoup, il se déformait et les trous des boulons d'assemblage des cornières n'étant plus en regard les uns des autres, il fallait les aléser, si bien que le montage fait au préalable à l'extérieur avant la descente en galerie n'était presque d'aucune utilité.

Dans l'intervalle annulaire qui séparait les deux tôles, les pertes d'air étaient souvent très fortes ; on le fermait alors avec une couronne d'argile dans laquelle on pratiquait successivement de petites ouvertures par où l'on enfilait le mortier; la pression

intérieure se chargeait d'entraîner ce dernier; avec des fiches en fer les maçons vérifiaient et assuraient au besoin la perfection du bourrage. Quand le sifflement avait disparu c'est qu'aucun vide ne subsistait plus.

L'armature elle-même n'était pas étanche, malgré les précautions prises pour la confection des assemblages ; en raison du peu de précision apporté à la coupe des tôles et au montage des cornières sur elles, un serrage énergique des joints ne suffisait pas à empêcher les pertes d'air.

Mais si cette perméabilité était un inconvénient pour le maintien de la pression intérieure et par suite une cause d'augmentation de dépense, elle était au contraire très avantageuse pour le revêtement; l'air enfermé dans la maçonnerie au moment de sa confection pouvait s'échapper au dehors ; il ne risquait pas de venir sourdre à l'intérieur en soufflant l'enduit, au moment de la décompression.

Faute d'une pareille issue pour les gaz, l'enduit du radier dut être partiellement refait ; quand, en effet, le travail terminé, on lâcha la pression, l'enduit se souleva et se fissura avant même que la surpression intérieure descendît à 0,4 d'atmosphère, de petites détonations et de légers sifflements indiquaient clairement qu'il y avait dégagement d'air. On plaça alors un grand nombre de tubes en fer dans la masse du béton et on refit les enduits; quand tout échappement d'air eut cessé, on boucha successivement les tubes avec des bouchons métalliques filetés.

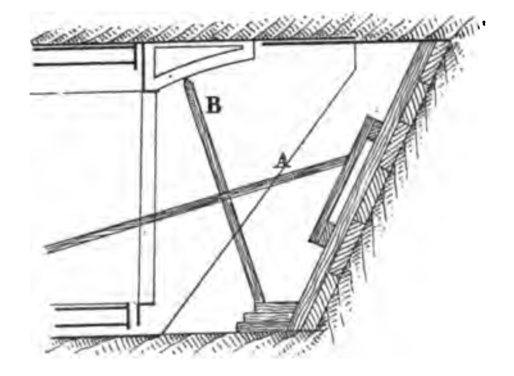


Fig. 52. — Dispositif employé pour faire monter le bouclier.

Nous avons dit plus haut comment on ramenait le bouclier dans la bonne direction quand il s'en écartait légèrement, soit en plan, soit en profil.

S'il s'agissait de le faire monter rapidement, au moyen d'une pièce A (fig. 52) on reportait à l'arrière la butée du masque, et on

engageait une seconde pièce inclinée B sous les consoles d'avant-bec; en avançant, l'appareil redressait cette chandelle et s'élevait d'autant.

Fin du travail. — On arrêta le bouclier en décembre 1898 à 3 mètres du puits vertical foncé sur la rive gauche ; on démonta la machinerie et tous les fers en ne laissant que l'enveloppe d'acier.

Le puits avait été exécuté par les moyens ordinaires et bétonné à l'aide d'un mandrin porté par quatre chaînes reliées à un câble. On l'avait descendu à une profondeur plus grande que celle prévue pour être sûr que la galerie le rencontrerait : on en fut quitte pour remplir la partie inférieure avec du béton.

La jonction entre la galerie et le puits fut réalisée au moyen d'anneaux courants coupés et montés à la demande.

Conclusion. — Le prix de revient fut par mètre linéaire de 333,74 fr. pour le puits et de 1245,93 fr. pour la galerie.

La substitution de l'acier à la fonte[1] dans la confection de l'armature était une innovation excellente ; outre que les segments d'un poids peu élevé étaient facilement maniables on a réalisé ainsi une sorte de galerie en béton armé, le métal travaillant à l'extension et la maçonnerie à la compression; l'expérience a montré ce qu'on peut attendre d'un pareil procédé de construction au point de vue de la résistance.

Le béton fut comprimé par les vérins même, au moment de la marche du bouclier; il ne serait pas prudent de compter sur son homogénéité absolue, il est très probable qu'il se trouve divisé en tranches de longueurs égales aux différentes courses, séparées par des surfaces de moindre résistance, car si l'effort de compression qui s'exerce sur un anneau n'est pas supérieur à celui qui a agi sur l'anneau précédent, il ne saurait le faire pénétrer dans ce dernier d'une façon suffisante, d'autant plus que l'effort très énergique sur la première tranche s'affaiblit sur les autres à mesure qu'on pénètre plus profondément dans la masse ; or, très

[1] Le revêtement métallique des siphons de Clichy (1892-1894) et de la Concorde (1895-1896) est en fonte de 25 et 20 mm. d'épaisseur.

souvent à une course effectuée avec une pression de 80 kg. par centimètre carré succédait une autre où 30 à 35 kg. suffisaient.

En pareil cas, il est prudent de compter plutôt sur l'enveloppe d'acier et de la calculer largement.

L'idée d'un intervalle laissé entre l'armature et le bouclier était fort heureuse, non seulement elle permettait de protéger le métal par un revêtement extérieur, mais surtout elle supprimait l'inconvénient qui résulte du bétonnage sous la queue même ; dans ce cas, en effet, quand on met la pression sur les vérins, le béton serré sous l'enveloppe s'oppose au mouvement de progression de celle-ci : il fonctionne comme un frein dont la puissance est directement liée à l'effort exercé par les presses.

Il y a peu de choses à dire de l'engin lui-même ; si les guides de réglage n'avaient eu que 0,25 m. de longueur le bouclier aurait eu plus d'indépendance par rapport à l'armature et le montage de celle-ci eût été plus facile.

En raison de la faible vitesse d'avancement on aurait pu réduire aussi la longueur du cintre métallique, la maçonnerie étant toujours prise bien avant le décintrement.

Quant aux phénomènes de soufflure des enduits, ils montrent que pour un travail analogue dans l'air comprimé, il est indispensable de ménager à l'air des issues d'autant plus nombreuses que l'armature est plus étanche.

CHAPITRE III

PROLONGEMENT DE LA LIGNE D'ORLÉANS DE LA PLACE WALHUBERT AU QUAI D'ORSAY

Exposé. — L'excentricité de la gare terminus du réseau d'Orléans, située place Walhubert, était une gêne considérable pour les voyageurs, surtout pour ceux des trains de nuit. Afin d'éviter cette sujétion, la Compagnie résolut de prolonger sa ligne principale jusqu'au cœur de la ville, sur l'emplacement de l'ancienne Cour des Comptes. Cette amélioration indéniable aura pour conséquence de donner un grand essor à toute une partie de la banlieue parisienne encore peu fréquentée et d'augmenter le trafic d'une façon notable. Le prolongement de la ligne de Sceaux jusqu'au carrefour Médicis accrut en effet de 40 p. 100 dès la première année le mouvement des voyageurs au départ de Paris et l'on peut espérer des travaux actuels un résultat aussi concluant.

La nouvelle gare construite en bordure des quais et de la rue de Bellechasse sera exclusivement réservée au service des voyageurs avec et sans bagages ; l'ancienne gare conservera son affectation primitive en ce qui concerne les trains militaires, d'excursions, de pèlerinage, les messageries et les postes.

Tracé. — La nouvelle ligne (fig. 53) plonge sous les bâtiments de l'administration, passe sous la place Walhubert, et débouche sur le quai bas Saint-Bernard près du pont d'Austerlitz. Elle suit la Seine à ciel ouvert jusqu'à l'amont du pont Sully, sur 650 m. environ, puis pénètre sous le quai haut et reste en souterrain jusqu'au point terminus.

Le niveau du rail est en général celui des eaux ordinaires de la Seine; afin d'éviter les infiltrations au travers des maçonneries on a ménagé dans les radiers des chapes montant jusqu'à 2 m. au-dessus du niveau de la retenue normale de Suresne. Un aqueduc central recueillera d'ailleurs les eaux et les conduira à des puisards d'où les pompes les rejetteront dans le fleuve.

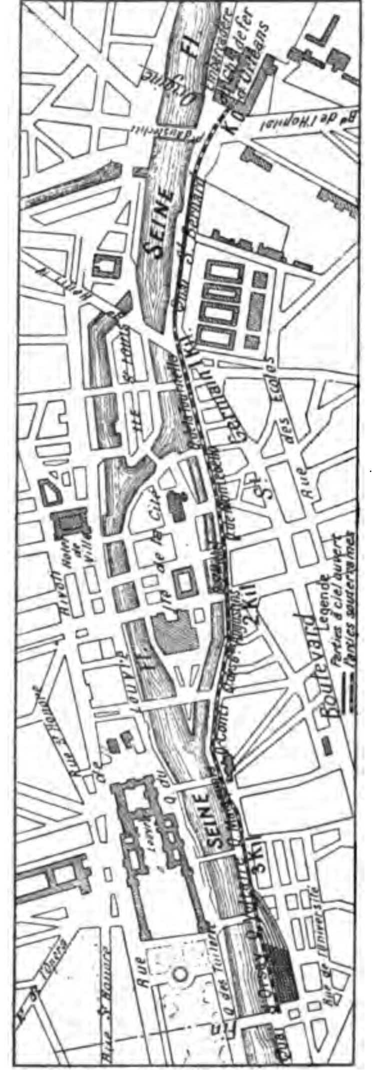


Fig. 53. — Prolongement de la ligne d'Orléans au quai d'Orsay. Plan général.

Section transversale. — Suivant l'espace dont on pouvait disposer sous les chaussées on a recouvert le souterrain d'une voûte ou de tabliers métalliques.

La largeur est de 9 m. correspondant à deux voies, la hauteur libre sur rail et sous clef n'est que 5 m. pour les voûtes et 4,50 m. pour les tabliers; ces hauteurs réduites sont suffisantes pour la circulation du matériel; leur adoption a permis de ne pas descendre les radiers trop bas, et par suite de diminuer les sous-pressions.

Sur les 500 derniers mètres entre la station de la place Saint-Michel et la gare du quai d'Orsay on a prévu deux voûtes accolées; le second souterrain servira au passage des voies de raccordement de la ligne de Sceaux avec la ligne principale.

Importance des travaux. — La longueur du tracé est un peu

supérieure à 4 kilomètres ; les dépenses ont été estimées à 40 millions dont 17 550 000 seulement pour l'exécution de l'infrastructure, y compris les frais de déviation d'égouts, conduites d'eau, canalisations électriques.

Des boucliers. — Pour le percement des parties voûtées du souterrain on recourut à l'emploi d'armatures métalliques. M. Chagnaud (l'entrepreneur du collecteur de Clichy extra-muros) obtint l'adjudication de ce travail ; il mit en service deux engins qui partirent l'un du pont Sully et l'autre de l'Institut.

PREMIER BOUCLIER

DU PONT SULLY AU PETIT PONT

Profit en travers. — Le premier bouclier chemina du pont Sully au Petit Pont en descendant la rive gauche de la Seine.

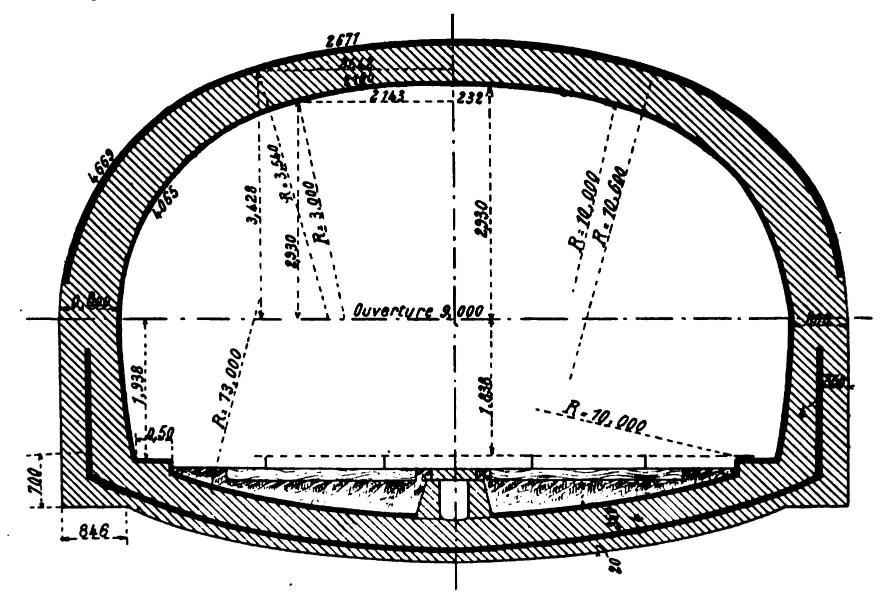


Fig. 54. — Section transversale normale.

Dans toute cette partie la section dite normale (fig. 54) a 9 m. de largeur et 5 m. de hauteur sur rail à la clef; le radier est con-

cave suivant un arc de cercle de 13 m. de rayon ; les piédroits ont 1,938 m. de hauteur, l'intrados de la voûte est une courbe à trois centres de 2,93 m. de montée. Les épaisseurs du revêtement sont : pour le radier, 59 cm. ; pour les piédroits, 60 cm. ; pour la voûte, 60 cm. en clef.

Une chape de 4 cm. d'épaisseur établie à l'intérieur des maçonneries, en mortier riche de ciment, est destinée à empêcher les infiltrations d'eau.

Tracé en plan et profil en long. — Le profil en long (fig. 55) présente successivement : une pente de 0,5 mm. sur 782,50 m. de

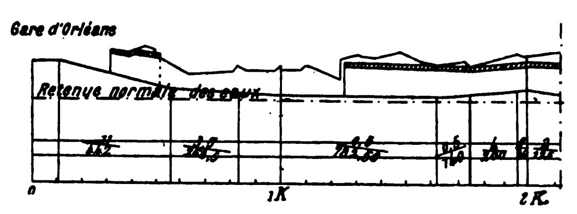


Fig. 55. — Profil en long de l'origine au Petit Pont.

longueur, une rampe de 0,5 mm. sur 140 m., une rampe de 4 mm. sur 200 m., un palier de 33 m. et une pente de 2 mm. sur 125 m.

Le tracé en plan est relativement sinueux ; après un alignement droit de 12,64 m. on rencontre une courbe de 300 m. de rayon sur 28,14 m., un alignement droit de 210,27 m., une courbe de 250 m. de rayon sur 38,20 m., un alignement droit sur 50,22 m., une courbe de 250 m. de rayon sur 55,80 m. et enfin un alignement droit de 48,55 m.

Bouclier. — L'armature métallique imaginée par M. Chagnaud se composait en principe de deux parties mobiles l'une par rapport à l'autre ; la portion d'arrière qui soutenait les terres devait rentrer dans le corps même à mesure de l'exécution du revêtement de façon à permettre un bourrage parfait et à éviter tout tassement.

Le bouclier proprement dit (fig. 56 et 57) était formé par deux tôles de 12 mm. d'épaisseur épousant la forme de l'extrados de

la voûte à construire sur 6 m. de longueur. L'avant se terminait en visière, l'arrière était limité normalement à l'axe.

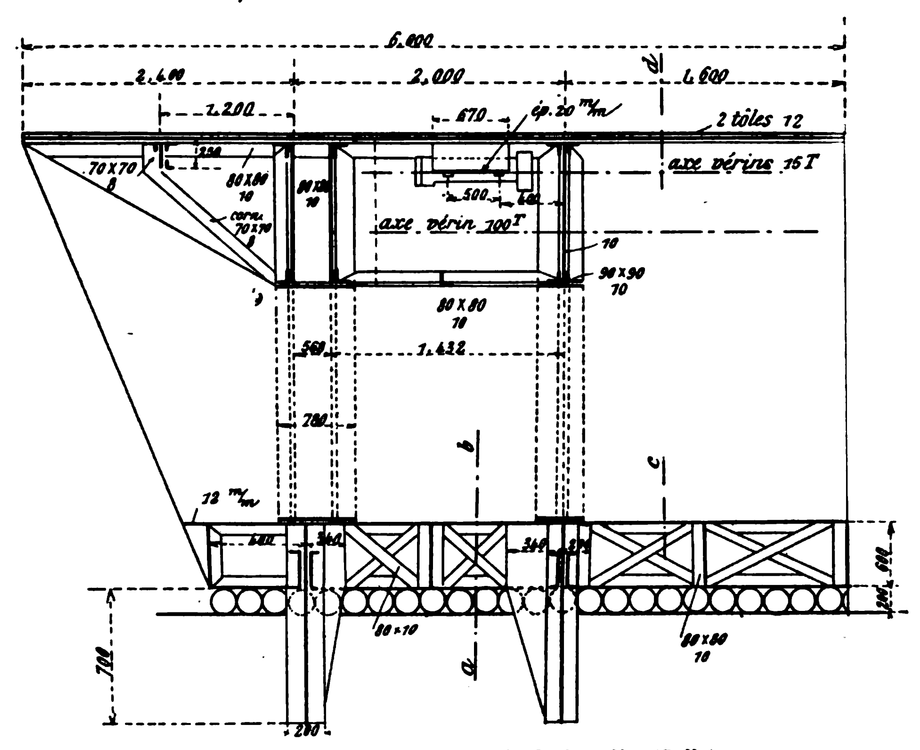


Fig. 56. — Coupe longitudinale du bouclier (Sully).

Deux poutres cintrées de 1,496 m. de hauteur espacées de 2 m. d'axe en axe assuraient la rigidité ; l'engin était ainsi divisé en trois parties ayant pour longueurs :

L'avant-bec	2,400 m.
Le corps.	2,000
La queue	1,600
Total	6,000 m.

Treize entretoises longitudinales reliaient les deux poutres sur toute leur hauteur, formant douze caissons où les vérins étaient logés.

La poutre d'avant avait deux âmes distantes de 568 mm. d'axe en axe; celle d'arrière était simple; des cornières de $\frac{90 \times 90}{10}$ fixaient

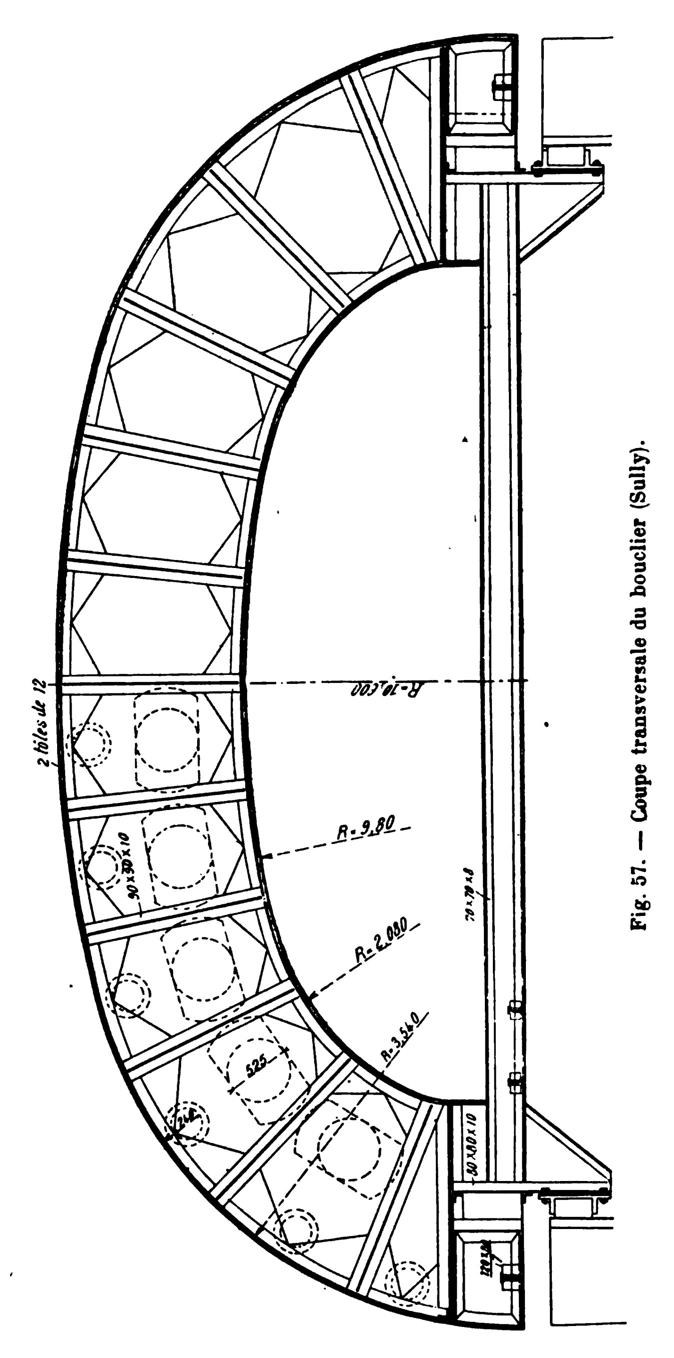


Fig. 57. — Coupe transversale du bouclier (Sully).

les âmes de 10 mm. d'épaisseur d'une part à l'enveloppe,

d'autre part à des semelles de 780 mm. ou 300 mm. de largeur.

Des poutrelles transversales de 300 mm. de hauteur fonctionnant comme tirant entre les pieds des poutres maîtresses réunies par des longerons constituaient un plancher inférieur continu.

Deux grands caissons latéraux de 4 m. de longueur et 0,60 m. de hauteur avaient pour but de donner de la rigidité à l'ensemble

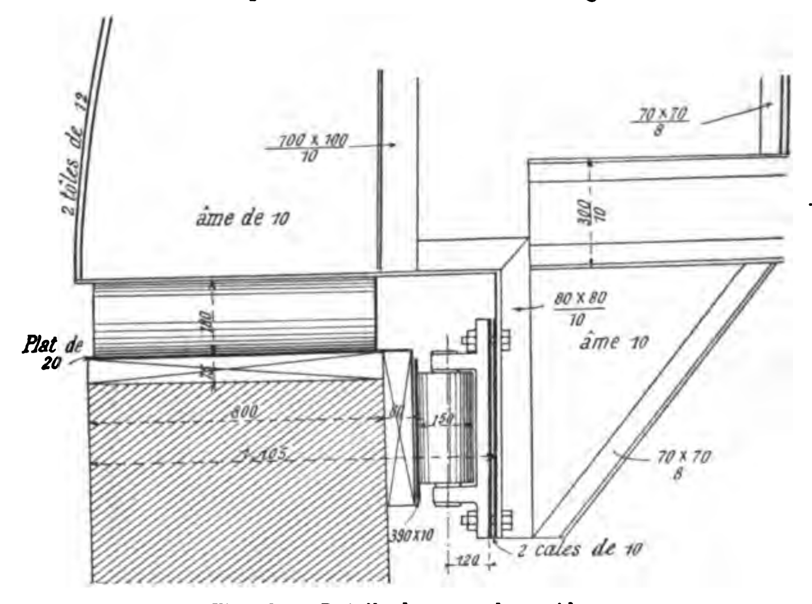


Fig. 58. — Détails des consoles guides.

et surtout de répartir le poids de l'engin et de sa charge sur les chemins de roulement.

Latéralement à ces caissons, en dessous, c'est-à-dire contre le parement des piédroits quatre consoles (deux de chaque côté) formées d'une âme de 10 mm. et de cornières de $\frac{80 \times 80}{10}$ supportaient des galets mobiles autour d'un axe vertical (fig. 58) ; en roulant contre les piédroits ces galets devaient maintenir le bouclier dans l'axe du tracé.

Vérins hydrauliques. — Dans chaque caisson étaient logés deux vérins, un gros et un petit; les deux caissons extrêmes seuls

ne portaient qu'un petit vérin, le nombre total des vérins était ainsi de 22, 12 petits et 10 gros.

Les gros vérins (fig. 59) servaient à la progression de l'arma-

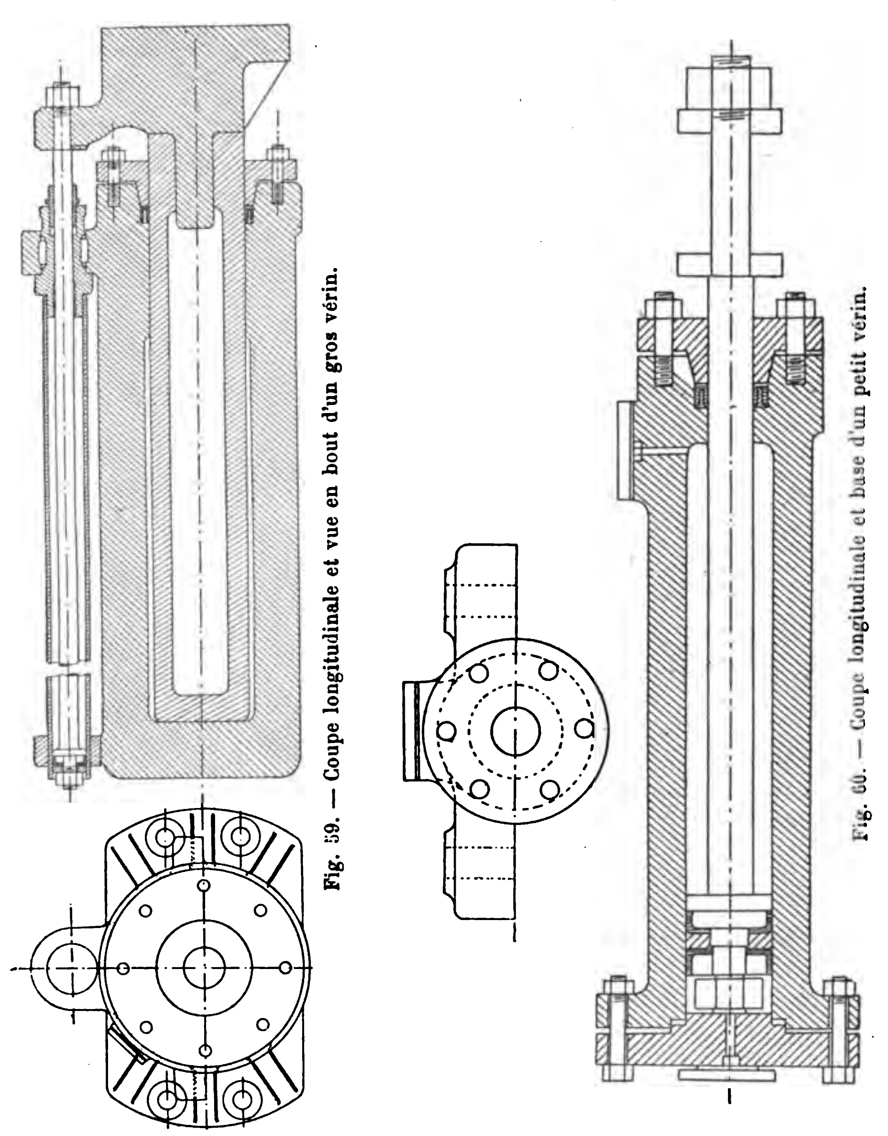


Fig. 59. — Coupe longitudinale et vue en bout d'un gros vérin.

Fig. 60. — Coupe longitudinale et base d'un petit vérin.

ture ; ils avaient une puissance de 100 t. et se composaient en réalité de deux appareils juxtaposés, d'une part un piston plongeur et son corps de pompe, d'autre part une presse de rappel pour rame-

ner le piston plongeur à sa position initiale et rendre possible un nouvel avancement.

La longueur totale de l'engin était de 1,975 m. la course du piston était de 1,200 m., son diamètre de 250 mm.; le diamètre extérieur du vérin de rappel était de 106 mm., la distance entre axes des deux appareils conjugués était de 350 mm.

Les petits vérins (fig. 60) étaient destinés à ramener en arrière les poutres longitudinales dont nous allons parler plus loin ; leur tige était munie d'un crochet auquel on attachait les chaînes de tirage de ces poutres ; ils étaient à double effet avec une puissance de 15 t., leur longueur totale était de 980 mm. ; le piston avait 115 mm. de diamètre et 0,60 de course.

Poutres longitudinales. — Dans l'exécution du collecteur de Clichy extra-muros on boisait le ciel à l'arrière du bouclier, au-dessus des cintres. Perfectionnant ici le système, M. Chagnaud avait imaginé de soutenir les terres au moyen de poutres et de madriers mobiles prolongeant la queue de l'armature (fig. 61).

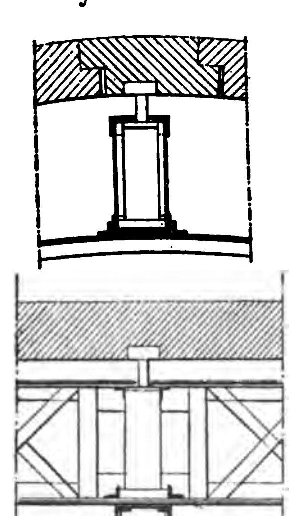


Fig. 61. — Détails d'une poutre longitudinale.

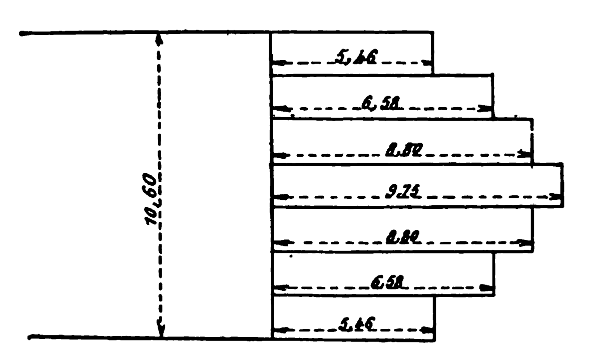
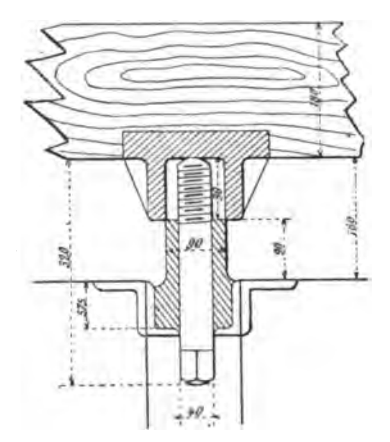


Fig. 62. — Disposition en plan des poutres longitudinales.

Les poutres, en treillis, étaient au nombre de trente-deux ; contournées en quart de cercle à l'avant elles se terminaient en sifflet à l'arrière ; leur largeur était de 25 cm., leur hauteur de 40 ; elles reposaient sur les cintres, longitudinalement, entre des cornières qui les guidaient dans leurs mouvements.

En plan (fig. 62) elles formaient redan les unes par rapport aux autres avec des longueurs de 5,46 m., 6,58 m., 8,80 m. et 9,75 m.

Des madriers de 180 mm. d'épaisseur recouverts de feuilles de tôle du côté des terres constituaient l'enveloppe jointive supportée par les poutres. Dans chaque poutre des vérins à vis en fer (fig 63) agissant sur des têtes en fonte encastrées dans le bois, permettaient de serrer les madriers contre le terrain.


Fig. 63. — Détails d'un vérin à vis.

On ramenait chaque élément sous l'armature au moyen de chaînes de tirage, de poulies de renvoi et des petits vérins de 15 t. que nous avons décrits ; les pièces de bois glissaient alors les unes sur les autres, tandis que les poutres se déplaçaient entre les cornières.

Appui du bouclier. — Les terrains à traverser étaient de consistance fort irrégulière ; on s'attendait à rencontrer des égouts, des maçonneries anciennes, des caves, des pilotis et même les culées des ponts ; il eût été imprudent dans ces conditions de faire reposer le bouclier sur le sol même trop sujet à tasser ; aussi résolut-on de lui assurer un chemin de roulement inébranlable en construisant les piédroits à l'avance, dans des galeries boisées. Sur la surface supérieure de la maçonnerie convenablement arasée et réglée on disposait des pièces de chêne de 75 mm. d'épaisseur, recouvertes d'une tôle de 20 mm., le bouclier se déplaçait là-dessus par le moyen de rouleaux, creux en fonte de 0,750 m. de longueur, 0,18 m. de diamètre extérieur et 0,06 m. de diamètre intérieur.

Les galets latéraux portés par les consoles avaient 150 mm. de diamètre, ils s'appuyaient contre le parement des piédroits par l'intermédiaire d'un plateau de bois dur de 80 mm. d'épaisseur fixé contre la maçonnerie et recouvert d'une tôle de 390 × 10 mm.

On espérait ainsi pouvoir suivre mathématiquement le tracé

en plan et en profil en évitant à la fois les mouvements de galop et les mouvements de lacet.

Cintres. — Le bouclier prenait appui sur les cintres, au nombre de 40, espacés de 1,10 m. d'axe en axe et entretoisés par des pièces de fonte.

4 cornières de $\frac{90 \times 90}{10}$ reliées par des croisillons de 50 mm. de largeur et 10 mm. d'épaisseur formaient ces cintres.

Au droit des entretoises, au nombre de 10 par cintre, on inter-

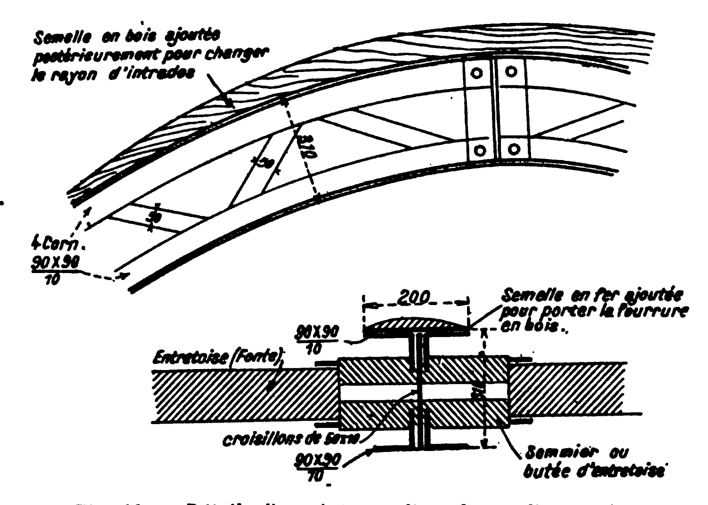


Fig. 64. — Détails d'un cintre et d'une butée d'entretoises.

posait un sommier creux traversé par quatre broches (fig. 64).

Le quadrilatère de ces 4 broches suffisait à maintenir en place les entretoises qu'on ne boulonnait point.

Au cours du travail, on modifia le rayon d'intrados pour augmenter la résistance du revêtement; on ajouta alors une semelle en fer aux cintres pour porter la fourrure en bois réglée d'après les nouvelles données.

Sur les 40 cintres, 39 étaient constamment en service, sur une longueur de $39 \times 1,10 = 42,90$ m., le 40e démonté à l'arrière était transporté puis remonté à l'avant quand le bouclier avait avancé de 1,10 m.

Chaque cintre se composait, pour la facilité du transport et du

réglage, de deux demi-cintres d'un poids de 500 kg., il reposait d'une part par des coins et des semelles sur des pièces verticales fichées dans les galeries longitudinales, d'autre part sur quatre butons de 20 × 30 cm. d'équarrissage (fig. 65).

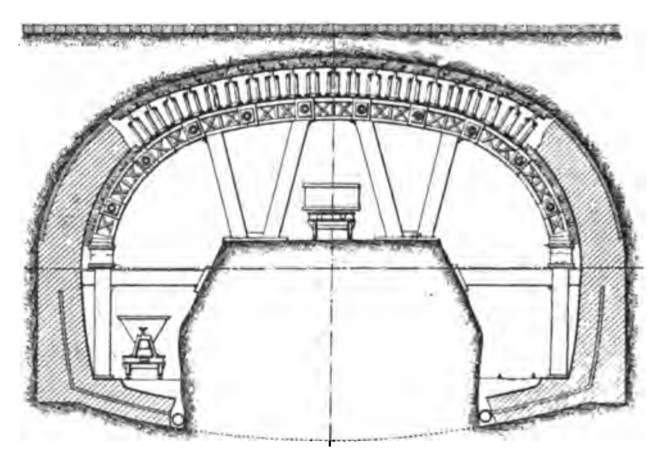


Fig. 65. — Coupe transversale sous les poutres longitudinales.

Des palans fixés sous l'enveloppe du bouclier assuraient un montage aisé et rapide de chaque élément.

Poids des pièces. — Le poids total de l'armature et de ses accessoires était de 260,5 t. se décomposant ainsi :

Bouclier, carcasse et rouleaux	54 t. 870
Cintres	125 t. 605
Machinerie et accessoires	48 t. 025
Total	228 t. 500
Poutres longitudinales	32 t.
Total général	260 t. 500

Construction des piédroits. — La première phase du travail (fig. 66) comprenait l'exécution d'une galerie boisée de 2,50 m. de hauteur, 2 m. de largeur au sommet et 2,70 m. de largeur à la base, les boisages du toit étant à 0,70 m. au-dessus des naissances de la voûte.

L'extraction des déblais s'effectuait en deux postes de huit heures au moyen d'une voie ferrée de 0,60 m. et du matériel correspondant.

Un troisième poste de huit heures — deuxième phase (fig. 67) — exécutait la maçonnerie. On enlevait les cadres et les planches de blindage à mesure ; on élevait la maçonnerie par assises de

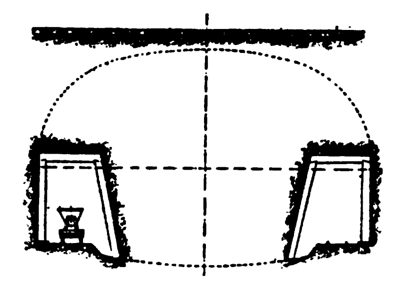


Fig. 66. — Construction des piédroits, 1re phase.

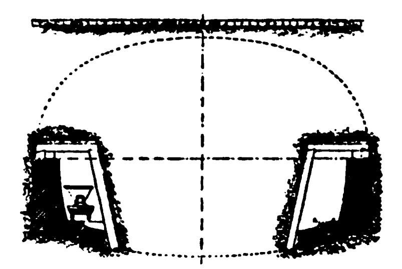


Fig. 67. — Construction des piédroits, 2e phase.

0,20 m. en y coulant la chape intérieure, de la sorte elle faisait corps avec le mortier des joints et donnait un massif compact.

Montage du bouclier. — Les galeries s'avançaient déjà sur 300 m. de longueur quand le bouclier se mit en marche en juin 1898.

Le montage s'était effectué en amont du pont Sully, sur le quai bas de la Seine, près de l'entrée du tracé sous le quai haut ; on avait creusé dans la chaussée une tranchée qui permit d'introduire l'engin exactement à sa place.

Plus tard, pour éviter la section du tunnel en sifflet, on rétablit la chaussée non pas sur voûte maçonnée mais sur un tablier métallique : on fit franchir à une longue poutre de 50 m. la coupure du quai haut et on y appuya des entretoises transversales pour supporter la voie ; le tunnel fut ainsi limité carrément par une tête convenablement architecturée.

Le 15 juin le bouclier fit sa première course ; pendant la période d'essais, du 15 au 22, il parcourut 5,90 m. ; jusqu'à la fin de juillet sa marche, retardée par divers incidents que nous allons relater, fut extrêmement lente.

Fonctionnement du bouclier. — Un plancher divisait l'avant-bec en deux parties ; six ouvriers à chacun des étages procédaient à l'abatage (troisième phase) (fig. 68).

Les déblais tombaient directement, sans aucune reprise, dans les wagons inférieurs rangés sur les voies des galeries latérales ; l'évacuation en était très rapide : elle n'était arrêtée que pendant le court espace de temps nécessaire au remplacement d'une rame de wagons pleins par une rame de wagons vides et encore cette manœuvre pouvait-elle coïncider avec celle de propulsion de l'engin.

Avant chaque course on posait les pièces de bois d'appui, on reportait à l'avant les rouleaux pris à l'arrière, on plaçait les

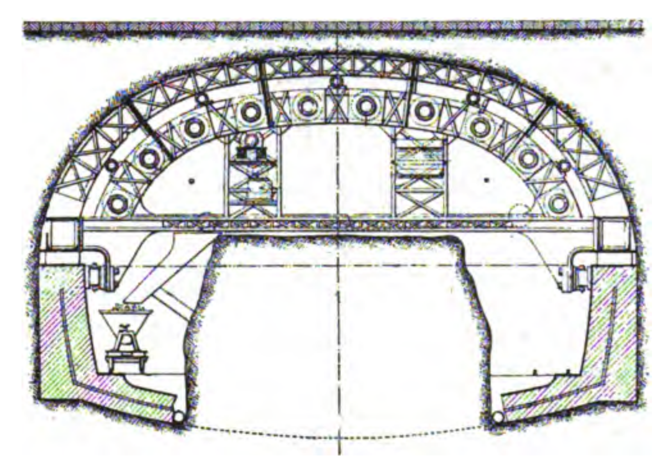


Fig. 68. — Exécution du déblai de la calotte, 3e phase.

semelles et les coins du nouveau cintre sous la queue, on montait et réglait ce cintre, et on fixait les entretoises ; prenant appui sur toute la série des cintres, le bouclier avançait de 1,10 m. ; pendant ce temps, on manœuvrait les petits vérins des poutres longitudinales pour comprimer le terrain et l'empêcher de remplir l'espace laissé vide par l'épaisseur de la tôle.

Une équipe de maçons exécutait le revêtement, sur des couchis légers de 0,30 m. de largeur et de 1,10 de longueur revêtus d'une feuille de tôle de 0,5 mm. d'épaisseur (voir fig. 12).

Fonctionnement des poutres longitudinales. — A mesure que ce travail avançait, on devait ramener les poutres sous le bouclier, d'un mouvement lent et seulement pour dégager le terrain à l'extrados de la longueur voulue ; à la cheville de chacune on

fixait une chaîne qui, passant sur la poulie de renvoi logée dans le caisson correspondant, venait s'attacher à la tige d'un des petits vérins de 15 tonnes (fig. 69). Comme la course de ces vérins n'était que de 0,60 m., il fallait effectuer en deux fois le tirage

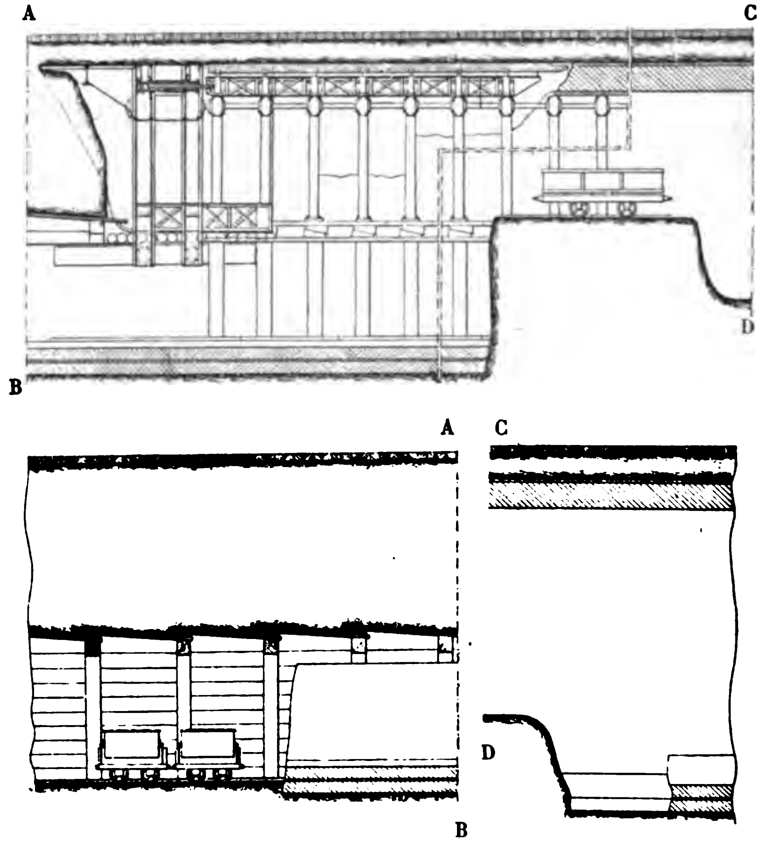


Fig. 69. — Fonctionnement des poutres longitudinales.

complet de la poutre : 1,10 m.; une bielle d'accrochage portait à cet effet deux trous espacés de 0,60 m., après une première course du vérin, on détachait la bielle, on ramenait le vérin à sa position initiale et on rattachait sa tige au deuxième trou de la bielle.

Insuccès du procédé. — Le décrochage et le raccrochage de la bielle n'étaient pas une opération aisée ; deux hommes n'y réussissaient pas toujours; placés sur un petit échafaudage volant

où ils pouvaient à peine se tenir debout, ils n'arrivaient que difficilement à tendre la chaîne ; or la distance des trous étant de 0,60 m., comme la course du vérin, la moindre flèche s'opposait au raccrochage.

Chaque vérin servait à tirer trois poutres : l'obliquité des chaînes était un deuxième obstacle.

Enfin, pour soutenir la charge du ciel, il fallait serrer fortement les poutres ; d'où un frottement énorme sur la terre et sur les cintres, frottement que ne put jamais vaincre l'effort des douze vérins. Avant l'entrée complète des poutres dans le souterrain, alors que la moitié de leur longueur était encore à nu on fut forcé de les soulever par des crics et de les pousser avec des vérins à vis.

Deux ou trois fois les chaînes cassèrent et quoique le diamètre des maillons fût de 12 mm., il est telle chaîne qu'on dût remplacer cinq fois.

Retour au procédé du collecteur de Clichy extra-muros. — Il fallut renoncer à l'espoir d'utiliser le soi-disant perfectionnement apporté au bouclier dans le but de supprimer tout tassement des terres et toute dislocation des maçonneries.

On démonta les trente-deux poutres, on supprima les douze vérins et on revint au système du collecteur de Clichy extra-muros.

A l'aide de faux chapeaux et de coins de serrage placés sur les cintres on appliqua contre le plafond les couchis de blindage de 0,08 m. $\times$ 0,16 m. $\times$ 100 m., jusqu'à rattraper l'épaisseur de 25 mm. de la tôle de l'armature. Les maçons reportaient à mesure les couchis sur les cintres; pour éviter de laisser du bois au-dessus de l'extrados on recourut comme à Clichy, à l'emploi de feuilles de tôle de 1,15 m. $\times$ 0,80 m. $\times$ 1/2 mm. repliées pour empêcher tout entraînement par le bouclier.

Le chantier de maçonnerie était ainsi indépendant de celui de déblai ; sa longueur pouvait être quelconque ; en fait il comprit de huit à dix-neuf maçons suivant l'avancement journalier. Il fallait en effet neuf journées pour exécuter la maçonnerie d'une travée complète ; soit pour quatre courses par vingt-quatre heures, trente-six journées ou dix-neuf maçons par poste.

A l'arrière il restait à enlever le grand stross et à construire le radier.

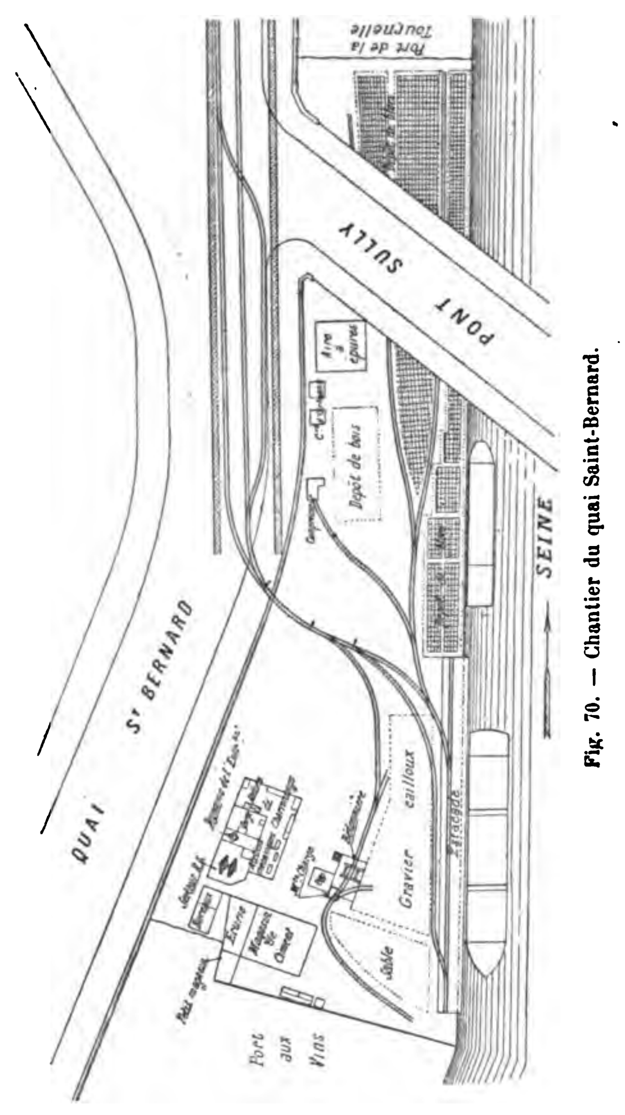


Fig. 70. — Chantier du quai Saint-Bernard.

Enlèvement des déblais, installations mécaniques. — L'évacuation des déblais s'effectuait, nous l'avons dit, par les galeries latérales des piédroits ; l'alimentation du chantier en pierres, mortier..., se faisait par la partie centrale.

Dans la partie encombrée par les cintres la traction était ani-

male ; dans la portion libre le tracteur était une locomotive à air comprimé Mekarski de 8 t. ; cette locomotive pouvait remorqure 40 t. à une vitesse de 6 km. à l'heure sur une rampe de 2 mm.

Une course du bouclier de 1,10 m. de longueur correspondait à 63 m³ de déblais, soit à 150 tonnes environ; la moyenne journalière étant de trois à quatre courses, le poids total à évacuer oscillait autour de 600 t. (pour la calotte seulement).

L'air comprimé était fourni sous une pression de 30 kg. Le compresseur tournait à 50 tours par minute.

Le secteur électrique de la rive gauche fournissait l'énergie sous forme de courant alternatif; une machine de 30 kilowatts actionnait le compresseur; un transformateur de 120 kilowatts, sous une tension de 220 volts, alimentait les bétonnières, les pompes d'épuisement, les machines-outils des ateliers de réparation. Au total l'installation comprenait 150 lampes et 12 dynamos.

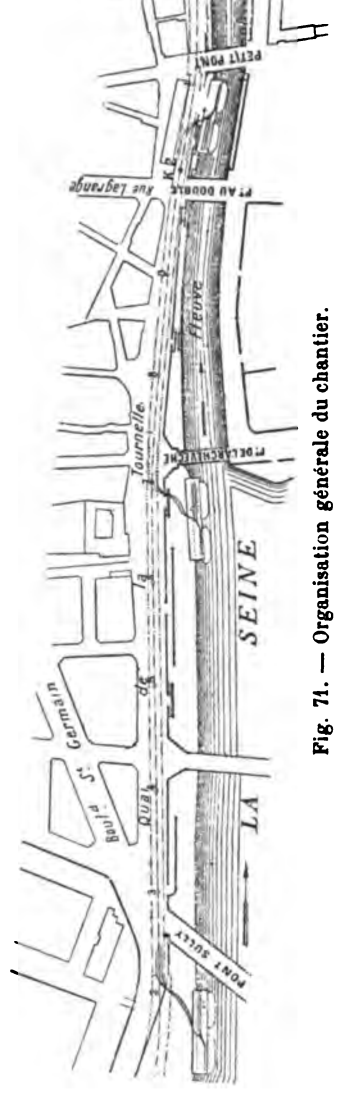


Fig. 71. — Organisation générale du chantier.

Organisation générale des chantiers. — Le chantier principal était établi sur le quai bas Saint-Bernard en amont du pont Sully, près de la tête du tunnel (fig. 70).

Il comprenait un abri pour le compresseur, des bureaux pour les agents de la Compagnie et de l'Entreprise, des magasins, des dépôts de matériaux, une bétonnière électrique horizontale avec monte-charges, capable de fournir 100 m³ de béton par vingt-quatre heures, et un baraquement réservé aux moteurs, à la forge et au charronnage.

Primitivement une estacade de 50 m. de longueur permettait l'accostage de deux bateaux, l'un pour l'enlèvement des déblais, l'autre pour l'arrivée des matériaux. Plus tard, après 400 m. de parcours, une deuxième estacade fut établie près du pont de l'Archevêché et assura le service des piédroits et de la voûte tandis que la première n'était utilisée que pour l'évacuation des déblais et l'exécution du radier.

Une troisième estacade près du Petit Pont desservait les galeries d'avancement (fig. 71).

Revêtement maçonné. — Chaque course du bouclier correspondait à 19 mètres cubes de maçonnerie.

On fit un emploi exclusif de moellons artificiels en béton comprimé fabriqués à Vigneux (Seine-et-Oise) ; le dosage en était le suivant :

Ciment Portland	225 kg
Cailloux	$0^{m^3}900$
Sable	$0^{m^3}600$

Les Ingénieurs de la Compagie trouvaient dans de pareils travaux de sujétion un avantage considérable à n'utiliser que des matériaux uniformes, prêts à la mise en œuvre. Déjà l'exécution de la ligne de Sceaux avait nettement mis en relief l'économie de temps et d'argent réalisée par la suppression de toute façon des matériaux sur place.

Marche du bouclier. — Mis en service le 15 juin 1898 au point kilométrique, 1211,30, le bouclier acheva sa tâche le 2 juillet 1899, après avoir parcouru 866,26 m. Sa vitesse fut très variable, suivant la nature des terrains rencontrés; en moyenne sur tout le parcours elle fut de 2,30 m. Si nous mettons à part les périodes où tout travail fut arrêté pour effectuer des réparations, nous constatons qu'il ne fit jamais moins d'une course par jour, soit 1,10 m.; la vitesse maxima en vingt-quatre heures, fut de 6,76 m. au droit de la rue de Bièvre.

Le diagramme ci-contre (fig. 72) résume la marche entière, il montre qu'on peut prendre 100 m. par mois comme une bonne moyenne d'avancement.

Le 4 juillet on commença le démontage de la machinerie, le

9 juillet on procéda au dérivetage. Tout fut retiré, même la tôle d'enveloppe.

Terrains rencontrés. — Un peu en aval du pont Sully on rencontra à droite un terrain meuble qui s'éboulait soit à l'avant, soit sur les côtés ; il en résultait des cloches et des excavations ; on eut recours au boisage du ciel en prolongement de l'avant-bec : le bouclier avançait sous cette enveloppe; on combla d'autre part directement les flâches de la chaussée.

Au quai de Montebello on rencontra de la maçonnerie sur la demi-largeur de la section, on interrompit la circulation et on ouvrit une tranchée sur 3,00 m. de large.

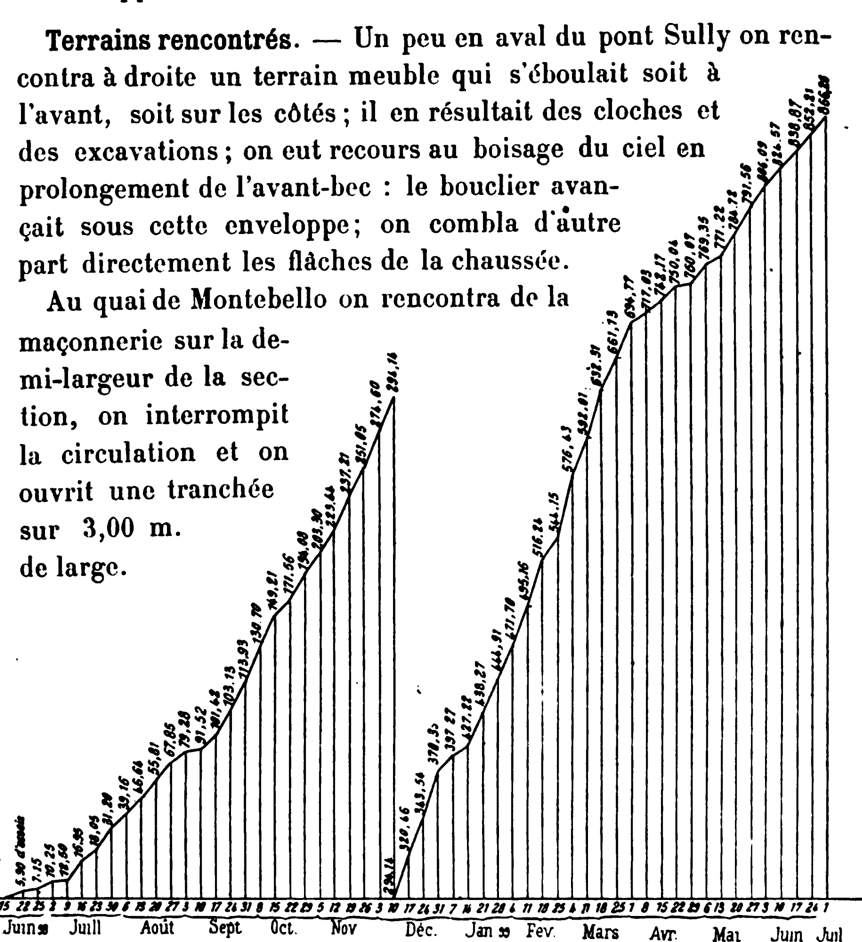


Fig. 72. — Diagramme de marche du bouclier (Sully).

Rue de Pontoise et rue de Bièvre une partie de l'exécution du souterrain était prévue à ciel ouvert, l'extrados de la voûte étant à une cote supérieure à celle de la chaussée : un peu avant d'arriver à ces points critiques, quand l'épaisseur des terres n'était plus que de 0,40 m. sur la tôle, le bouclier repoussant la chaussée devant lui l'élevait en bourrelet jusqu'à 1 m. de hauteur (Ex : 23 décembre 1898) : on dut ouvrir la tranchée plus tôt qu'on ne l'avait prévu.

En dehors de ces cas particuliers on n'interrompit jamais complètement la circulation des voitures sur le quai.

Nulle part on ne trouva d'eau sous la calotte ; dans l'exécution des piédroits au contraire on rencontra des couches aquifères, on eut recours aux épuisements et même on ne fonda en certains points les piédroits que jusqu'à une faible profondeur remettant à plus tard l'exécution de la partie inférieure, simultanément avec le radier.

Incidents et avaries. — Outre ce gros événement, la suppression des poutres mobiles, d'autres incidents se produisirent.

Les dix vérins avaient leur tête et leur tige en fonte ; quand ils ne portaient pas d'aplomb sur les entretoises des cintres, un angle travaillait plus que les trois autres ; la tige se brisait ; on dut remplacer la tige en fonte par une tige de fer ; on fit subir cette transformation à neuf vérins, tout en conservant leur patin.

Nous avons dit que chaque presse comprenait un appareil de rappel placé en dessous de lui ; dans le mouvement de retour du piston, à cause de la dissymétrie des actions, de fréquents coïncements se produisirent, nécessitant beaucoup d'attention et de soin dans la manœuvre. Il eût été préférable de mettre au-dessus le vérin de rappel ; un seul vérin fut ainsi transformé ; dès ce moment il fonctionna mieux.

Il faut reconnaître toutefois que l'une ou l'autre des deux dispositions est en principe vicieuse : la dissymétrie des efforts est extrêmement préjudiciable à la résistance d'un tel engin ; seul le genre de presse employé au deuxième bouclier, que nous décrirons plus loin, échappe à ce reproche.

Le bouclier lui-même souffrit peu. Les guides latéraux destinés à assurer la direction en plan furent rapidement abandonnés : on n'en pouvait tirer aucun service ; les vérins qu'on manœuvrait isolément étaient plus efficaces.

Sous la charge maxima de 3 m. de remblai qu'elle porta la tôle de la queue se faussa de 4 à 5 cm., comme la maçonnerie s'exécutait à l'arrière cet incident n'avait aucune importance.

Aucun des cintres ne fut mis hors de service ; quand le bouclier était désaxé ils se déformaient sous la poussée des presses ;

mais ils revenaient seuls à leur position primitive quand les vérins rentraient dans leur logement.

Nous avons dit qu'on changea le gabarit par l'addition d'une fourrure en bois ; le rayon à la clef fut abaissé de 10 m. à 6,80 m. ; l'extrados restant le même on réalisa ainsi plus de flèche et plus d'épaisseur aux reins.

Conclusions. — La construction préalable des piédroits offrait deux avantages :

1° Elle était très propre à assurer la direction de l'armature en plan et en profil ; les consoles et leurs galets, toutefois, faute d'une résistance suffisante ne furent d'aucune utilité et il fallait veiller attentivement sur l'engin pour éviter les mouvements de lacet.

D'ailleurs, l'emploi de rouleaux pesants, difficiles à manier et à déplacer, ne semble pas devoir faciliter cette opération du réglage.

2° L'extraction des déblais s'opérant par les galeries latérales, le chantier était toujours d'un accès aisé et le service d'amenée des matériaux s'effectuait sans aucune gêne.

L'échec complet du système des poutres longitudinales d'arrière a montré qu'il était sinon impossible au moins très difficile de réaliser la mobilité du ciel de protection des maçons ; sans doute on arriverait ainsi à un blocage parfait de la maçonnerie du revêtement contre le sol, mais le frottement à vaincre est énorme et peut-être faut-il craindre que le terrain trop ébranlé se mette en mouvement, augmente les pressions et désorganise les chaussées.

L'emploi d'un boisage pour l'exécution du revêtement ne pouvait être évité après cet échec ; nous avons déjà dit, à propos du bouclier de Clichy extra-muros, combien peu un tel procédé est rationnel.

DEUXIÈME BOUCLIER

DE L'INSTITUT A LA RUE GUÉNÉGAUD

Section transversale à établir. — Le deuxième bouclier mis en service par l'entreprise Chagnaud partit du voisinage de l'Institut et suivit les quais en remontant la Seine.

Le projet général dressé par les Ingénieurs de la Compagnie prévoit sur cette partie la construction de deux tunnels accolés de 8 m. de largeur chacun (fig. 73) ; le second de ces tunnels ne sera construit que plus tard quand on aura opéré la fonction de la ligne de Sceaux avec la ligne principale, mais le premier est dès

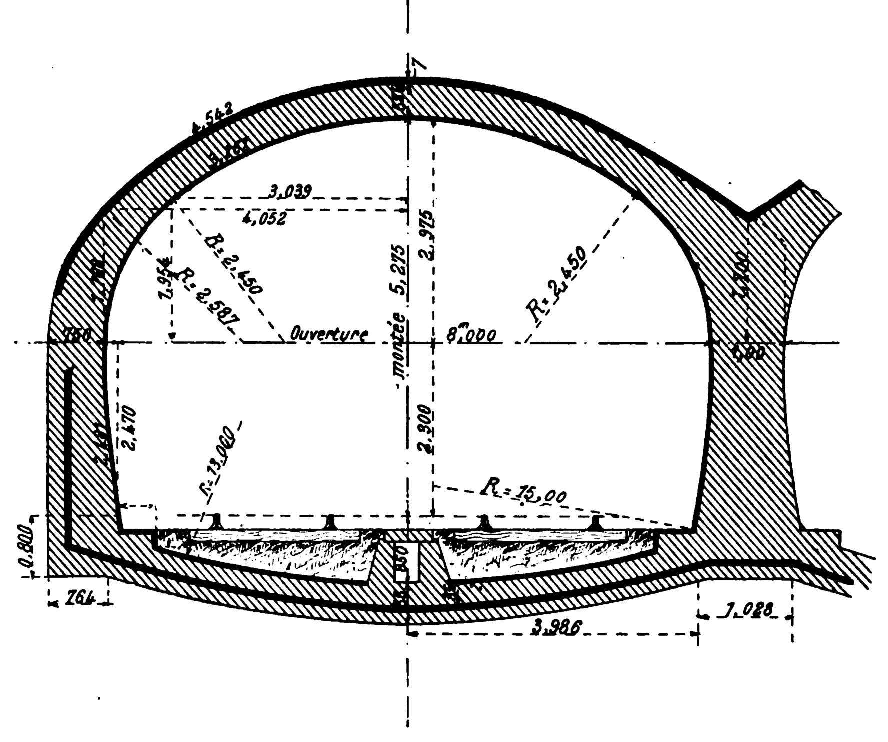


Fig. 73. — Section transversale (2 tunnels de 8 m.).

maintenant établi avec une largeur de piédroit extérieur suffisante pour qu'on puisse lui accoler la deuxième voûte.

La section à réaliser comporte une largeur de 8 m., une hauteur libre au-dessus du rail de 5,275 m. ; la courbe d'intrados est à trois centres, elle a 2,975 m. de montée ; l'épaisseur de la voûte est de 0,55 m. à la clef, 0,75 m. aux naissances ; le radier concave avec un rayon de 13 m. a 0,55 m. d'épaisseur, le piédroit renforcé a une largeur de 1 m. au niveau des naissances et de 1,40 m. à la base.

Outre l'enduit intérieur qui recouvre toute la maçonnerie, on

ménage sur la calotte une chape de 7 cm., dans le radier et dans les piédroits une chape de 4 cm.

Tracé en plan et profil en long. — De l'Institut à l'Hôtel des Monnaies le profil en long du tracé (fig. 74) présente trois pentes de 0,5 mm. sur 260 m., de 5 mm. sur 86,65 m. et de 0,5 m. sur 380,85 m.

En plan, après un alignement droit de 51,13 m. de longueur, viennent : une courbe de 200 m. de rayon et 80,20 m. de

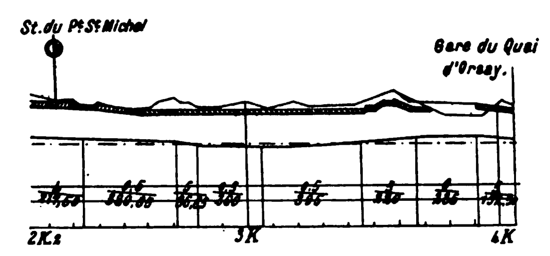


Fig. 74. — Profil en long du Petit Pont au quai d'Orsay.

longueur, un alignement droit de 37,80 m., une courbe de 300 m. de rayon sur 117,02 m., un alignement droit de 117,97 m., et enfin une courbe de 300 m. de rayon et 34,79 m. de longueur.

Bouclier métallique. — L'armature métallique (fig. 75 et 76) sortait des ateliers de M. Champigneul; elle était dissymétrique comme la voûte qu'elle devait servir à construire.

Elle se composait d'une tôle de 20 mm., d'épaisseur et de 7,080 m. de longueur, portée par deux poutres maîtresses distantes de 1,640 m.

Ces deux poutres avaient 0,560 m. de hauteur, elles étaient formées d'une âme de 20 mm., rivée par 4 cornières de $\frac{120 \times 120}{12}$ d'une part à l'enveloppe extérieure, d'autre part à une deuxième tôle de 15 mm., formant intrados sur 2,90 m. de longueur; elles étaient solidarisées par 20 entretoises longitudinales groupées deux par deux au-dessus des vérins qu'elles servaient à supporter.

La tôle de l'avant-bec, taillée en visière, s'arrêtait à 60 cm. au-dessus des naissances; elle était soutenue par 20 consoles et renforcée d'une deuxième tôle au tranchant.

La tôle de la queue était doublée sur toute sa longueur; en porte-à-faux sur 1,840 m., elle était portée à son talon par 20 consoles de 1,100 m. de longueur.

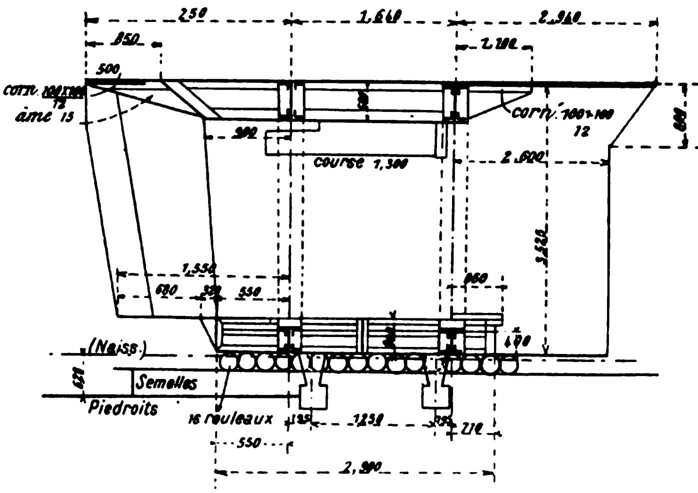


Fig. 75. — Coupe longitudinale du bouclier (Institut).

Le poids de l'engin était reporté sur les piédroits par deux caissons latéraux de 0,60 m. de hauteur et 2,90 m. de longueur,

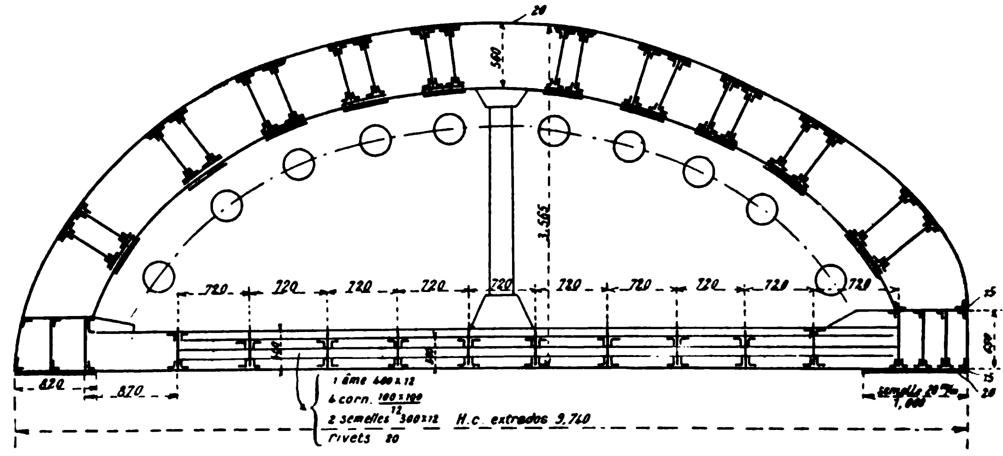


Fig. 76. — Coupe transversale du bouclier (Institut).

reposant directement sur les rouleaux. Un plancher inférieur de 400 mm. d'épaisseur entretoisait les poutres maîtresses et servait à porter la machinerie.

Deux galets verticaux, distants de 1,250 m. d'axe en axe, s'appuyaient contre les parements des piédroits.

Les dimensions extérieures extrêmes de l'engin étaient :

Hauteur	3,565 m.
Longueur	7,080
Largeur	9,740

Vérins et machinerie. — Les vérins étaient au nombre de dix, disposés en couronne au-dessous des poutres-maîtresses ; ils différaient absolument des presses du premier bouclier ; l'appareil de rappel était, en effet, placé au centre de l'appareil principal, disposition heureuse qui, réalisant la symétrie des actions, évite les coincements et diminue les chances de bris (fig. 77).

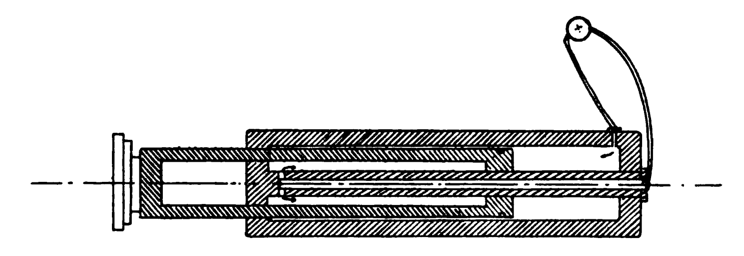


Fig. 77. — Schéma d'un vérin.

Le diamètre des pistons plongeurs était de 240 mm., soit une surface de 450 cm^2 ; l'effort total développé sous la pression moyenne de marche de 80 kg par cm^2 s'élevait ainsi à 275 t.

La course des vérins était de 1,30 m., elle s'effectuait en 15 minutes.

La pompe était horizontale, à 3 corps.

La dynamo motrice avait une force de 15 chevaux et fonctionnait sous une tension de 200 volts. Toute la machinerie était concentrée au milieu de l'appareil.

Le poids du bouclier seul était de 70880 kg. ; celui de la machinerie et des vérins de 30 000 kg. — Et tout 100,88 t. ; les cintres, dont nous allons parler, pesaient ensemble 30 000 kg. ; soit au total 130,880 t.

Mode d'appui. — Cintres. — Le bouclier roulait sur les piédroits construits à l'avance ; 16 rouleaux de 18 mm. de

diamètre, pesant 65 kg. chacun, étaient intercalés entre le plancher inférieur de l'engin et les piédroits sur des semelles

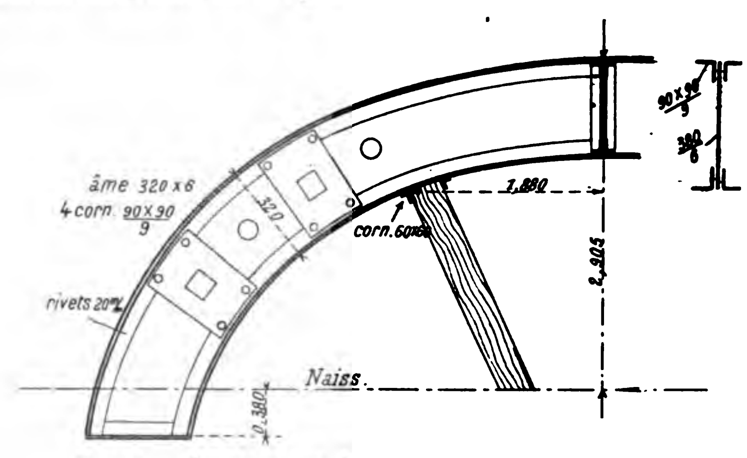
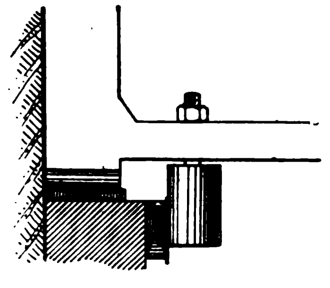
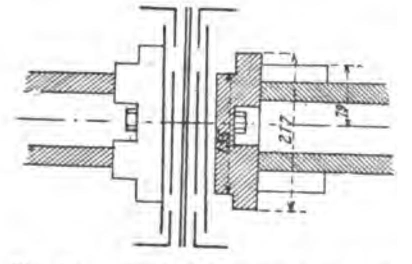


Fig. 78. — Élevation d'un demi-cintre et coupe transversale.

en bois d'orme recouvertes d'une tôle de 1,5 mm. d'épaisseur.

Il prenait appui sur 40 cintres métalliques espacés de 1,20 m., et formés d'un fer plat de $\frac{380}{6}$ raidi par 4 cornières de $\frac{90 \times 90}{9}$; chaque cintre était supporté par ses calages et par 2 butons engagés entre des cornières (fig. 78). La solidarité des différentes fer-





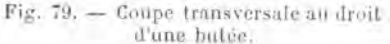


Fig. 79. — Coupe transversale au droit d'une butée.

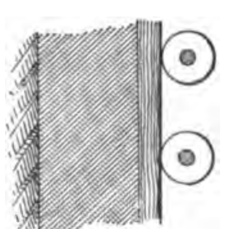


Fig. 80. — Détails des galets guides. Élévation et plan.

mes était assurée par des butées creuses, en fonte, établies au droit des axes des vérins.

Pour permettre la direction en plan, l'engin était muni de quatre guides latéraux, deux au droit de chaque piédroit.

Chacun de ces guides (fig. 80) était formé d'un galet cylindrique vertical, mobile autour d'un axe fixé au plancher de l'armature; il s'appuyait contre une semelle en bois, protégeant le parement de la maçonnerie et recouverte d'une tôle.

Couchis. — Les couchis, au lieu d'être parallèles à l'axe du tunnel, étaient transversaux; ils étaient formés de petits panneaux de menuiserie (fig. 81) ayant 1,00 m. de longueur et 0,23 m. de largeur, supportés par 5 traverses taillées suivant le gabarit de l'intrados. La jonction de deux panneaux consécutifs s'effectuait sur une semelle posée sur l'entretoise en fonte.

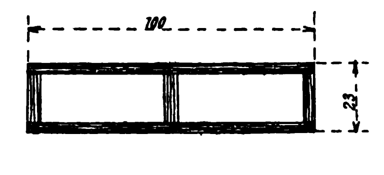




Fig. 81. — Détails d'un panneau : plan et élévation.

Fonctionnement. — Les piédroits étaient construits à l'avance, mais pas sur toute leur hauteur; en raison du voisinage de la

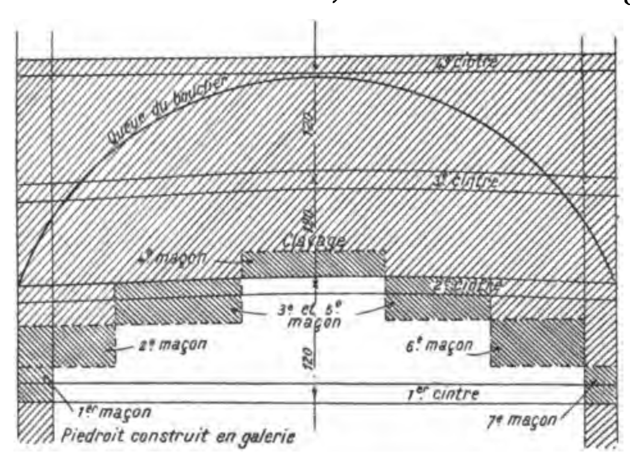


Fig. 82. — Chantier de maçonnerie, croquis schématique.

nappe d'eau souterraine, on ne les avait exécutés que sur 1,40 m. seulement; on les reprit plus tard en sous-œuvre quand les épuisements furent complets.

Un plancher volant partageait en deux parties la chambre de travail ; l'évacuation des déblais se faisait par l'avant, au travers de l'ancien collecteur de Bièvre, désaffecté en raison même des travaux en cours.

La course de 1,20 m. correspondant à l'écart entre deux cintres s'effectuait en trois fractions de 0,40 m. pour permettre un bourrage continu entre la maçonnerie et le terrain. L'exécution du revêtement était de même partagée en trois échelons (fig. 82) ; la longueur de la queue était telle qu'immédiatement après chaque course il y avait sous l'enveloppe trois cintres, soit une longueur de 2,40 m. Entre les deux premiers on maçonnait les naissances et les reins, entre les deux autres on clavait ; on laissait 5 cm. de vide sous l'enveloppe. Avec des battes en bois on bourrait du mortier à mesure de l'avancement de l'armature.

L'approche des matériaux se faisait par l'arrière ; il y avait ainsi indépendance complète entre les deux services d'approvisionnements et d'évacuation.

Équipes. — 10 hommes étaient employés à l'abatage ;

3 au transport et au montage des cintres ;

7 maçons, un chef maçon et leurs aides, à l'exécution du revêtement ; celui-ci d'ailleurs était fait en meulière et non en blocs de béton comprimé.

Montage et essais. — Le bouclier fut monté au mois d'avril, quai Malaquais, près du palais de l'Institut, au point 3110,75 ; il fut achevé le 24 avril. Dès le 30 avril on coupa l'enveloppe au-dessus des naissances, sur 1,05 m. de hauteur et 1,45 m. de longueur, afin de pouvoir bloquer la maçonnerie contre le terrain ; la première course eut lieu le 3 mai à 6 heures 10 ; elle fut de 0,80 m. A ce moment les galeries des piédroits avaient déjà comme longueur, à gauche 98,55 m., et à droite 93,45 m.

Terrains rencontrés. — Le terrain rencontré était surtout composé de remblais coupés de vieilles maçonneries ; l'ancien mur de quai, notamment, fut suivi sur une grande longueur.

Vitesse. — Parti le 3 mai 1899, du point 3108,85, le bouclier fut arrêté au point 2749,17, le 29 août à 6 heures 10 du soir, près de la rue Guenegaud, à 1,20 m. environ du point indiqué à

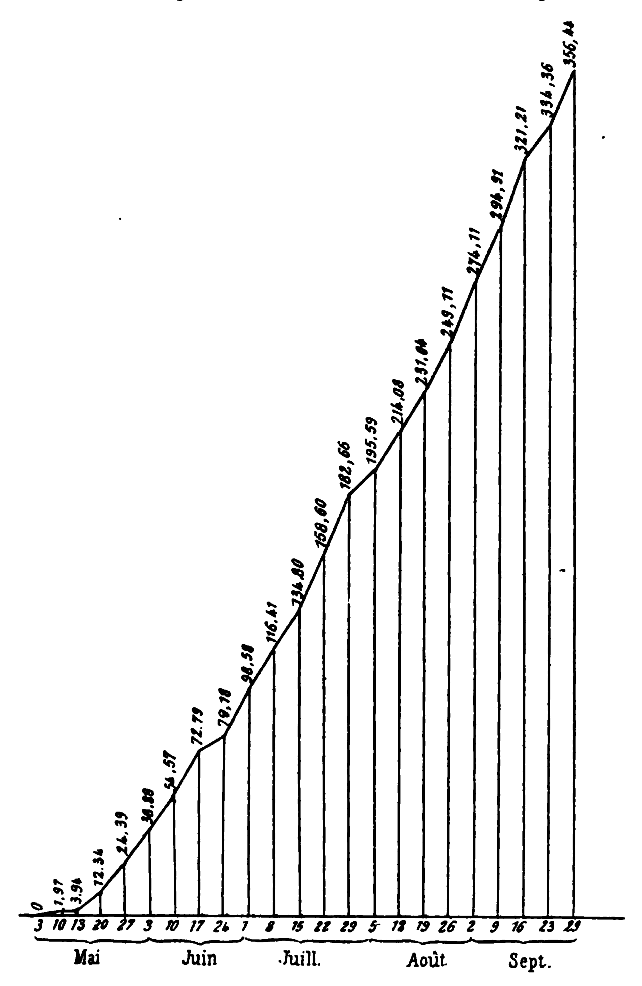


Fig. 83. — Diagramme de marche du bouclier (Institut).

l'Entreprise comme le terme de sa carrière ; il parcourut ainsi 356,44 m. en 118 jours, soit avec une vitesse moyenne générale de 3,04 m. par jour.

Exception faite de la première semaine où par suite d'avaries et d'incidents divers, il ne parcourut que 1,97 m. son plus grand parcours hebdomadaire fut de 25 m., correspondant à 3,67 m.

par jour, son plus petit, exceptionnel d'ailleurs, fut de 6,39 m. correspondant à 0,91 m. par jour.

Incidents. — Dès le départ, forçant contre de la maçonnerie, on faussa ou brisa des vérins et on déforma le premier cintre; on rencontra ensuite un vieux mur de quai dont le parement était en pierre de taille, on dut même pour démolir les maçonneries anciennes (31 mai) ouvrir une tranchée à ciel ouvert sur l'avant du bouclier. En général on refaisait la chaussée à mesure, car le bourrage, quoique exécuté avec soin, ne pouvait combler les vides énormes laissés par l'arrachage des moellons et autres obstacles.

Quand l'abatage était très lent les maçons étaient en avance sur les mineurs et quoiqu'on eut réduit leur nombre de 8 à 6, on était contraint de les employer au bardage des cintres; plus tard, au mois de juillet, c'étaient au contraire les maçons qui retardaient les mineurs et faisaient perdre 2 courses de 0,40 m. par poste de 11 heures.

Dans les terrains ébouleux on prolongeait la tôle d'avant-bec par des palplanches en bois qu'on engageait entre l'enveloppe et une cornière rivée à 0,30 m. en arrière du couteau.

Par suite d'affaissements répétés de la tôle de la queue on dut relever l'armature pour retrouver le gabarit normal des maçonneries. On augmenta donc l'épaisseur des calages; ceci eut deux inconvénients : d'abord le chemin de roulement étant en sapin, le bouclier le comprimait inégalement et ondulait; ensuite les guides latéraux ne portant plus sur une hauteur suffisante, maintenaient mal la direction.

L'importance des pressions latérales fut ici nettement mise en évidence, la tôle de friction appliquée sur le parement des piédroits fut cisaillée par le galet avec une netteté absolue; on ne remarqua pourtant pas que le piédroit lui-même fût fissuré ni déversé.

Sous l'effort des presses, les entretoises de fonte se comprimaient et les cintres reculaient en glissant sous la voûte; de nombreuses mesures ont montré que l'amplitude de ce mouvement oscillait entre 14 et 18 mm. par course; quand les vérins

rentraient dans leur logement, les cintres revenant à leur position primitive risquaient d'entraîner la maçonnerie fraîche ; aussi calait-on les couchis (fig. 84) contre la poutre arrière du bouclier,

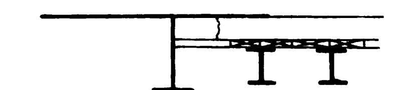


Fig. 84. — Dispositif employé pour empêcher les couchis de revenir en avant.

au moyen de 8 butons placés au droit de chaque entretoise ; de la sorte on n'observa jamais de mouvement des couchis ni de fissures dans le revêtement.

Conclusions. — Quand le bouclier acheva sa course, il était, ainsi que les cintres, en très bon état, il aurait facilement pu fournir une plus longue carrière.

Outre l'appui sur les piédroits exécutés à l'avance, il importe de signaler dans son emploi trois points de détail qui ne furent pas sans influence sur le résultat final :

Les guides latéraux, à galets verticaux portant contre le parement des piédroits, diminuaient dans une mesure notable l'importance des mouvements de lacet.

L'emploi comme couchis de petits panneaux transversaux à l'axe de l'ouvrage facilitait l'exécution du revêtement, les maçons ne posant ces panneaux devant eux qu'à mesure des besoins, restaient plus libres de leurs mouvements.

L'utilisation de l'ancien collecteur de Bièvre comme galerie d'évacuation des déblais, assurait l'indépendance complète des deux services d'arrivée des matériaux et d'enlèvement des déblais.

Mais on peut faire à l'engin deux reproches : d'un côté, la queue avait une longueur égale à 41 p. 100 de la longueur totale, ce qui eût été excessif si la base d'appui n'avait été indéformable. De l'autre, la tôle d'avant-bec ne descendait pas suffisamment bas ; elle aurait dû se prolonger jusqu'au niveau du plancher inférieur ; dans les terrains ébouleux il se serait produit par là des coulages suivis de graves accidents.

CHAPITRE IV

COLLECTEUR DE BIÈVRE

Exposé. — Pour permettre à la nouvelle ligne d'Orléans de suivre les quais jusqu'à l'emplacement de l'ancienne Cour des Comptes, il fallut dévier le collecteur de Bièvre et procéder à un remaniement complet des égouts.

Le collecteur de Bièvre suivait la rue de Jussieu, la rue Monge et le boulevard Saint-Germain, il descendait le boulevard Saint-Michel jusqu'à la place Saint-Michel, où le collecteur des quais d'Austerlitz, de moindre importance, venait le rejoindre, longeait les quais de la rive gauche et au pont de l'Alma, franchissait la Seine en siphon pour se jeter sous le nom de collecteur Marceau dans le grand collecteur d'Asnières.

La déviation du collecteur (fig. 85) se fit par la rue Saint-Jacques, la rue des Ecoles, la rue de l'Ecole de Médecine, le boulevard Saint-Germain et la rue de Solférino. Le collecteur des quais passant sous la rue des Fossés-Saint-Bernard se raccorda au collecteur de Bièvre dans la rue des Ecoles.

Entre le boulevard Saint-Germain et la Seine on établit un collecteur bas le long de la rue de l'Université, de la rue Jacob, de la rue Saint-André-des-Arts, du boulevard Saint-Michel, de la rue de la Harpe, de la rue de la Huchette, de la rue de la Bûcherie et de la rue des Grands-Degrés ; à la rue de Solférino ce collecteur bas passe sous le collecteur de Bièvre, dans lequel il se jette rue de Bourgogne.

Pour raccorder la ligne de Sceaux à la gare du quai d'Orsay, il faudra dévier le collecteur bas qui aujourd'hui franchit le boulevard Saint-Germain près de la place Saint-André-des-Arts ; mais en ce point on a réservé une chute de 0,80 m. qui permettra de réaliser l'allongement de parcours nécessaire.

Collecteur de Bièvre. — C'est pour la construction du collecteur de Bièvre qu'on employa des armatures métalliques.

La longueur totale à exécuter était de 2 446,15 m., elle fut partagée en 2 lots : de la place Saint-Germain-des-Prés à chacune des extrémités.

Le nombre des points d'attaque était limité à 3 pour chaque lot, à savoir : pour le 1er lot : 1° aux abords du quai d'Orsay ; 2° devant le Ministère des Travaux publics, près de la rue du Bac ; 3° devant l'Académie de Médecine, au coin de la rue des Saints-Pères. Pour le 2e lot : 1° près de la rue de Rennes ; 2° près de l'Ecole de Médecine ; 3° au coin de la rue Saint-Jacques et de la rue des Ecoles.

Fig. 85. — Plan général des égouts remaniés.

Section transversale. — Le collecteur devait être construit suivant deux types différents dits A et B.

Le type A (le plus petit) (fig. 86) est à section elliptique : il présente 4 m. de largeur libre au niveau du grand axe ; les banquettes ont 75 cm. de largeur, elles sont placées à 0,65 m. en contre-bas de ce grand axe et laissent entre elles une cunette de 2,20 m. de largeur et 1,10 m. de hauteur ; l'épaisseur du revêtement est de 35 cm. en clef, pour la voûte et le radier, 45 cm. aux naissances et 50 cm. au niveau des banquettes. Sur la calotte l'enduit a 1 cm. d'épais-

seur, sur les banquettes et la cunette il est de 3 cm. La largeur

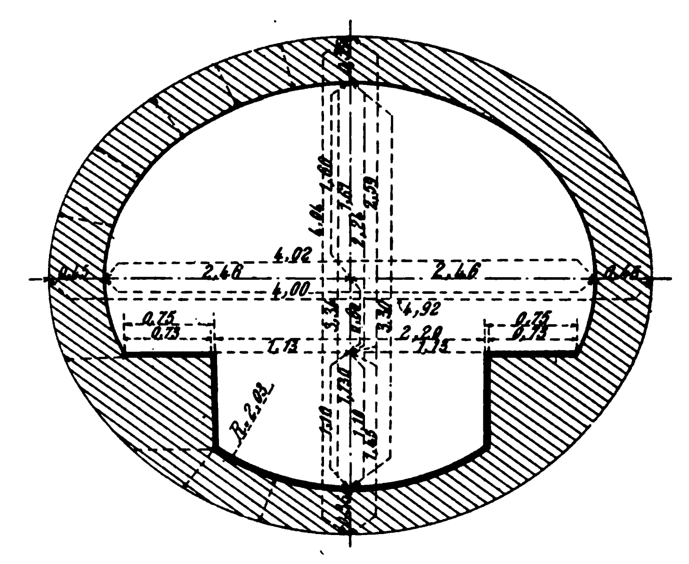


Fig. 86. — Section transversale type A 4,003 × 3,30 ; cunette 1,10 × 2,20.

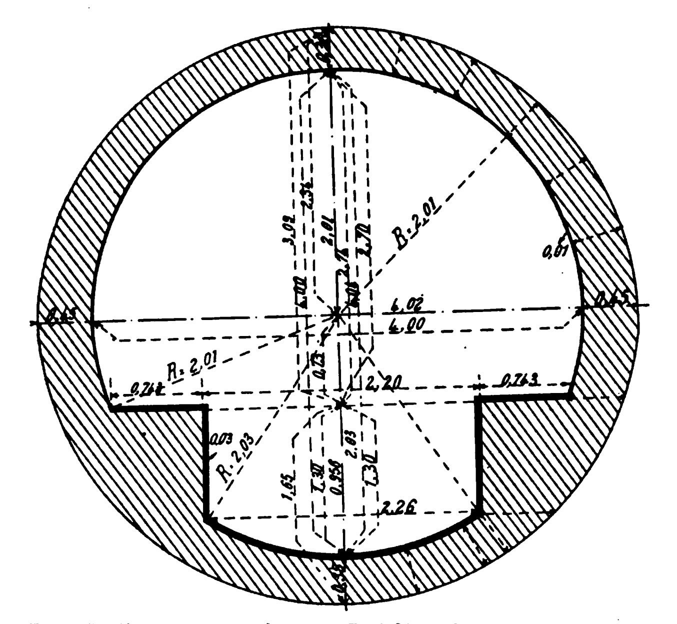


Fig. 87. — Section transversale, type B, 4,00 × 4,00 ; cunette, 1,30 × 2,20.

extérieure de la section est ainsi de 4,920 m. et sa hauteur de 4,05 m. ; la hauteur libre sous clef est de 3,30 m.

Le type B (fig. 87) est circulaire avec un rayon de 2 m.; sa largeur intérieure est donc de 4 m. ; les banquettes sont à 0,73 m. en dessous du diamètre horizontal ; leur largeur est de 75 cm. ; la cunette a 2,20 m. de largeur et 1,30 m. de hauteur ; l'épaisseur du revêtement est de 0,35 m. à la clef de la voûte et du radier, de 0,45 m. sur le diamètre horizontal, 0,47 m. au niveau des banquettes ; les enduits ont la même épaisseur que pour le type A ; les dimensions extrêmes extérieures sont de 4,92 m. en largeur et 4,74 m. en hauteur. La hauteur libre sous clef est de 4 m.

PREMIER LOT

Chantiers. — Le premier lot avait une longueur totale de 1296,13 m., du quai d'Orsay à l'église Saint-Germain-des-Prés. Il fut exécuté d'après le type B (400/400), de la rue de Rennes à la

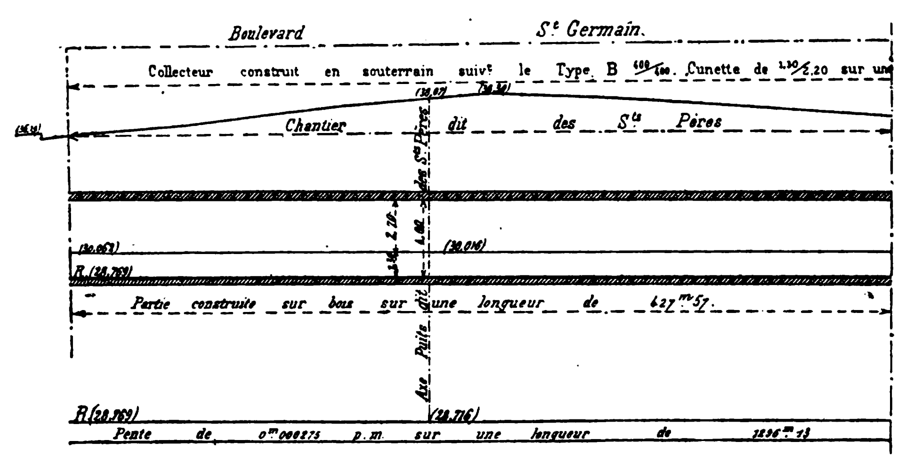


Fig. 88. — Profil en long du 1er lot, chantier des Saints-Pères.

rue du Bac, soit sur 643,38 m., et d'après le type A (400 × 330) de la rue du Bac au quai d'Orsay, soit sur 652,75 m.

Le travail était réparti entre trois chantiers que nous appellerons des Saints-Pères, du Ministère et Solférino, du nom des puits ou galerie servant à l'extraction des déblais.

Le chantier des Saints-Pères (fig. 88) allait de l'origine au point 427,57 m. entre les rues Saint-Guillaume et Saint-Thomas-

d'Aquin ; le percement dans cette partie fut effectué sur bois par les procédés ordinaires.

Le chantier du Ministère (fig. 89) avait 405,78 m. de longueur ; il

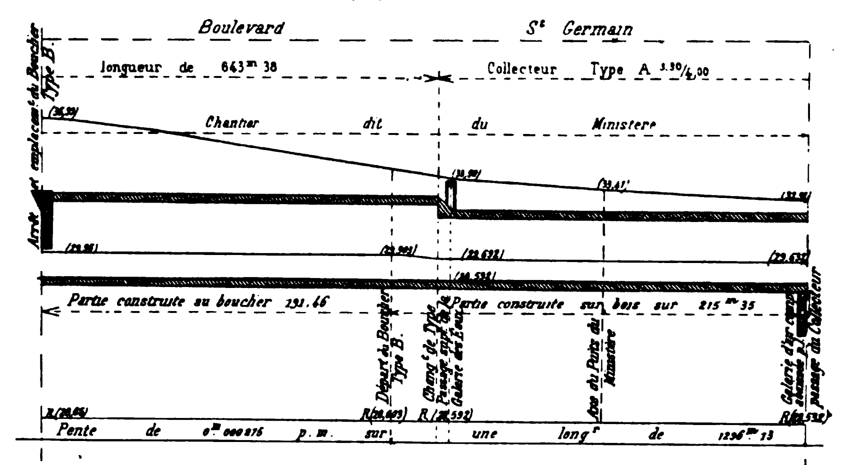


Fig. 89. — Profil en long du 1er lot ; chantier du Ministère.

se terminait au point 833,35 m. ; un bouclier circulaire y fonctionna sur 191,46 m.; 215,35 m. furent exécutés sur bois ; c'est d'ailleurs dans cette partie, au point 643,38 m., qu'avait lieu le changement de type de B. à A.

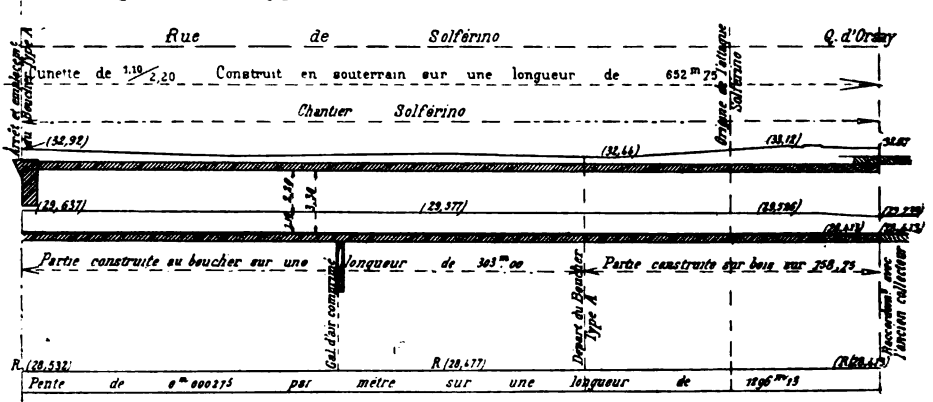


Fig. 90. — Profil en long du 1er lot ; chantier Solférino.

Le chantier Solférino (fig. 90) enfin s'étendait du point 833,35 m. à l'extrémité du lot ; de ses 462,78 m. de longueur, 303 m. furent percés avec un bouclier elliptique, 158,75 m. par le procédé sur bois.

Ne voulant parler ici que de l'emploi des armatures métalliques, nous ne dirons rien du percement sur bois ni du travail considéré dans son ensemble.

BOUCLIER DIT SOLFÉRINO (ELLIPTIQUE)

Bouclier métallique. — Le bouclier dit Solférino (fig. 91 et 92) était de forme elliptique comme la voûte qu'il devait servir à construire ; il sortait des ateliers de M. Champigneul.

Il se composait de trois parties assemblées les unes aux autres par des boulons. L'avant-bec avait 1,800 m. de longueur, le corps

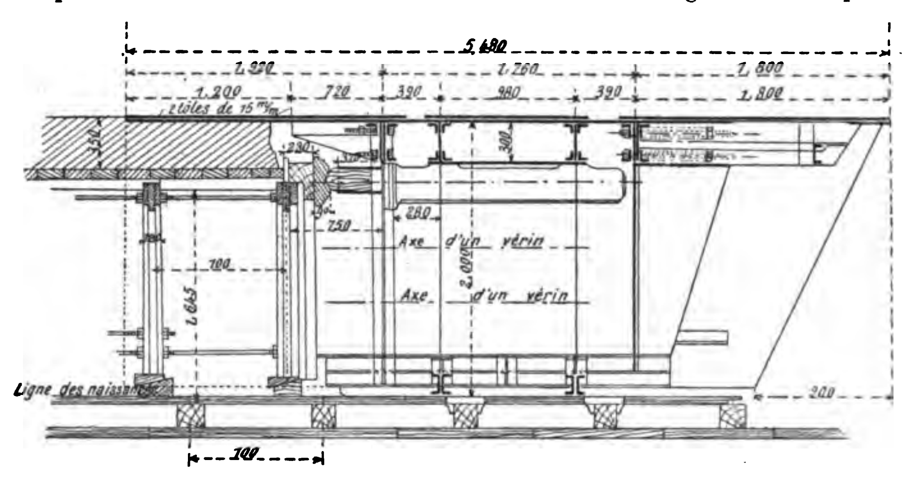


Fig. 91. — Coupe longitudinale du bouclier elliptique.

1,760 m., la queue 1,920 m., soit en tout 5,480 m. L'enveloppe descendait jusqu'au niveau des naissances ; elle était formée d'une tôle d'acier de 18 mm. d'épaisseur, doublée d'une deuxième tôle sur presque toute sa longueur sauf dans l'avant-bec dont le talon et le couteau étaient seuls renforcés ; 2 poutres elliptiques de 300 mm. de hauteur, distantes de 980 mm. d'axe en axe étaient l'élément principal de la résistance ; ces poutres se composaient d'un fer plat et de 4 cornières rivées, d'une part, à l'enveloppe extérieure, d'autre part, à une seconde tôle de 15 mm. d'épaisseur et de 1,200 m. de longueur formant intrados ; entre leurs pieds 2 fers en U de 200 mm. faisaient fonction de tirants et portaient

le plancher inférieur ; un deuxième élément de résistance était fourni par les tôles et cornières d'assemblage des 3 morceaux dont se composait l'armature entière.

L'avant-bec taillé en forme de visière était soutenu par 6 consoles et renforcé presque à son extrémité par un fer en U transversal. Dans le corps même les deux poutres principales de rigidité

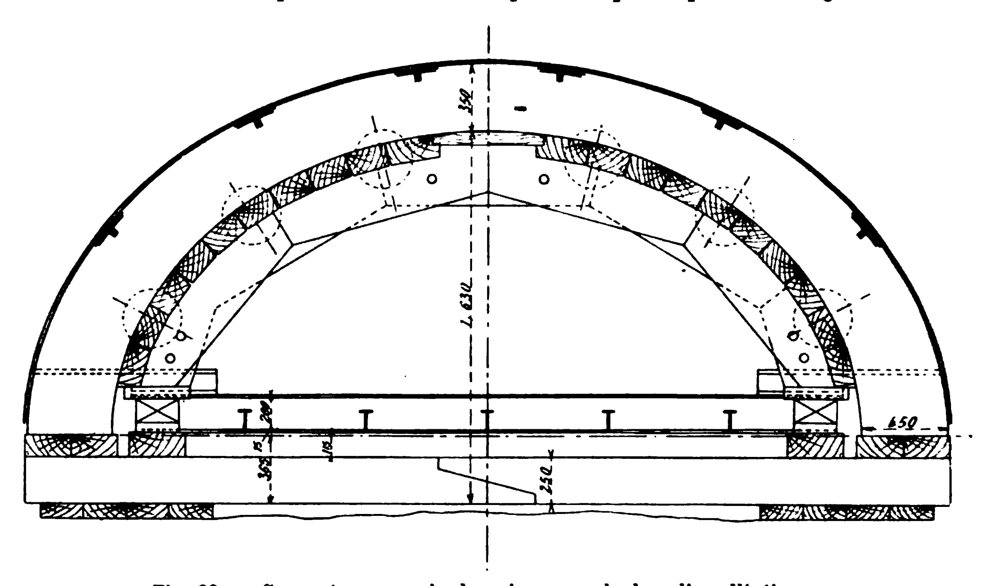


Fig. 92. — Coupe transversale dans la queue du bouclier elliptique.

étaient réunies sur leur hauteur par 6 entretoises; la queue enfin coupée carrément en porte à faux sur 1,200 m. était renforcée en son talon par 6 consoles de 7,20 m. de longueur descendant jusqu'à la tôle intérieure.

Deux poutres longitudinales inférieures de 25 cm. de hauteur répartissaient la pression sur les appuis.

La hauteur totale de l'armature était de 2,00 m., sa largeur intérieure de 4,92 m.

Appui. — Sur le sol on plaçait latéralement 4 madriers parallèles à l'axe de l'ouvrage et transversalement à eux des poutrelles de 25/25 cm d'équarrissage espacées de 1 m. ; le bouclier glissait là-dessus par l'intermédiaire d'une semelle A à talon

intérieur (fig. 93) et de rails longitudinaux B de 1 m. de longueur assemblés à mi-épaisseur. La distance d'axe en axe des rails était de 4,500 m. ; le plan de glissement était d'ailleurs à peu près au niveau des naissances.

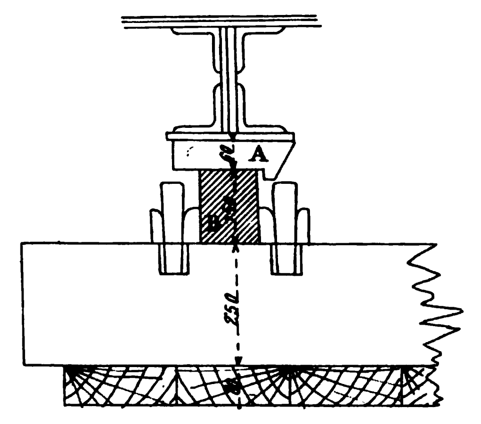


Fig. 93. — Détails des appuis.

Vérins, machinerie.— Les presses au nombre de 6 étaient fixées sous les poutres maîtresses et uniformément réparties sur le pourtour de la section. Leur longueur était de 1,75 m., les pistons avaient un diamètre de 170 mm. et une course de 1,03 m. correspondant à l'intervalle de 2 cintres consécutifs ; les vérins de rappel étaient logés au centre des appareils principaux.

Pour une pression de 200 kg. par centimètre carré chaque vérin développait un effort de 57,8 t., soit 346,8 t. pour l'ensemble des six.

La pompe et la dynamo motrice qui marchait sous une tension de 110 volts étaient placées sur le plancher inférieur, l'une à gauche, l'autre à droite.

Appui des vérins. — On coiffait la tête de chaque vérin d'un manchon cylindrique de 370 mm. de longueur terminé par une pièce de bois dur de 180 mm. de diamètre et 345 mm. de longueur. Au moment de la progression, tous ces butons arrondis à leur extrémité venaient se loger dans des coupelles en fonte suspendues au droit de leurs axes à une ferme d'appui.

La ferme d'appui était en chêne, elle avait 230 mm. d'épaisseur et coiffait le dernier cintre posé, mais ne portait, par une plaque de tôle, que contre les couchis et non contre le cintre lui-même.

Cintres et couchis. — Les cintres étaient en bois, au nombre

de 20, espacés de 1 m. d'axe en axe et reliés les uns aux autres par 3 tirants en fer boulonnés. Chaque cintre était formé de 3 madriers de 60 mm. découpés en 4 ou 5 vaux de 25 cm. de joue ; les couchis avaient 120 mm. d'épaisseur et 220 mm. de largeur.

Fonctionnement. — Quand les mineurs du front d'attaque avaient suffisamment dégagé le terrain on poussait l'armature en avant en mettant l'eau sous les presses. Une course entière comprenait :

1° La descente de la ferme d'appui formée de 2 morceaux ;

2° L'enlèvement à l'arrière des rails de glissement ;

3° La pose du cintre en bois ;

4° L'exécution de la maçonnerie sous la tôle de la queue ;

5° Le déblai à l'avancement pour l'emplacement de la semelle d'appui ;

6° Le réglage et la pose de la semelle dans la bonne direction et de niveau ;

7° Le placement des rails de glissement ;

8° La mise en marche successive de la dynamo, des pompes et des presses et la pose des coupelles de fonte pour recevoir les calottes des butées des vérins.

La pression effective varia entre 30 et 150 kg. par centimètre carré, correspondant à des efforts totaux de 50 à 260 tonnes ; le plus souvent 200 tonnes suffisaient amplement, et l'anneau de la calotte était maçonné en une seule fois.

En raison de la faible profondeur de l'armature au-dessous de la chaussée, on effectuait parfois les injections de remplissage non de l'intérieur de l'ouvrage mais de l'extérieur par un sondage.

L'appareil devait décrire des courbes d'un rayon inférieur à 70 m. C'est pour cette raison que le constructeur l'avait constitué de trois parties se recouvrant mutuellement ; il proposait de le plier avec des vérins suivant le tracé à effectuer après avoir desserré les boulons d'attache, il espérait pouvoir ainsi tourner suivant un très petit rayon.

Enlèvement des déblais, piédroits. — Les déblais chargés en wagon étaient conduits sur les quais de la Seine en suivant une galerie creusée à cet effet ; de là ils étaient jetés dans des bateaux ; la traction était faite par des manœuvres ; en raison d'ailleurs de la pente générale vers le fleuve, l'effort à faire était peu considérable.

Les piédroits et le radier repris en sous-œuvre étaient exécutés après coup par anneaux de 2 m. de longueur. La maçonnerie était en meulière hourdée avec mortier de ciment de Portland dosé à 350 kg. par mètre cube de sable.

Equipes. — Le chantier comprenait :

1 chef mineur, 3 mineurs, 3 terrassiers occupés à l'abatage et au chargement des déblais ;

6 manœuvres pour le roulage (le nombre de ces manœuvres variait suivant la longueur du chantier), 1 manœuvre pour l'approvisionnement des matériaux ;

2 maçons et 2 garçons construisaient le revêtement.

A l'arrière, 10 terrassiers et 4 mineurs travaillaient à l'abatage du stross et à la reprise en sous-œuvre des piédroits et du radier que maçonnaient 4 maçons aidés de 5 garçons.

Montage, essais. — Le bouclier fut monté en septembre 1898, au point 1 136,25, en face le n° 5 de la rue de Solférino au fond d'une fouille boisée de 7 m. de largeur, 7,80 m. de longueur et 3,50 m. de hauteur ; le commencement du mois de novembre fut employé aux essais ; la mise en marche réelle eut lieu vers le 10 ; le 19 il y avait déjà 24,50 m. de faits.

Tracé en plan et profil. — Dans la partie suivie par le bouclier, le tracé présentait en profil, une rampe uniforme de 0,275 mm. par mètre (voy. fig. 90).

En plan (fig. 94), après un alignement droit de 65 m. on rencontrait une courbe de 200 m. de rayon, puis une courbe et une contre-courbe de 70 m. et 80 m. de rayon pour tourner sous le boulevard Saint-Germain et sur le reste du parcours un alignement droit.

Terrains rencontrés. — Le terrain traversé se composait principalement de remblais ; on rencontra quelques bancs de calcaire

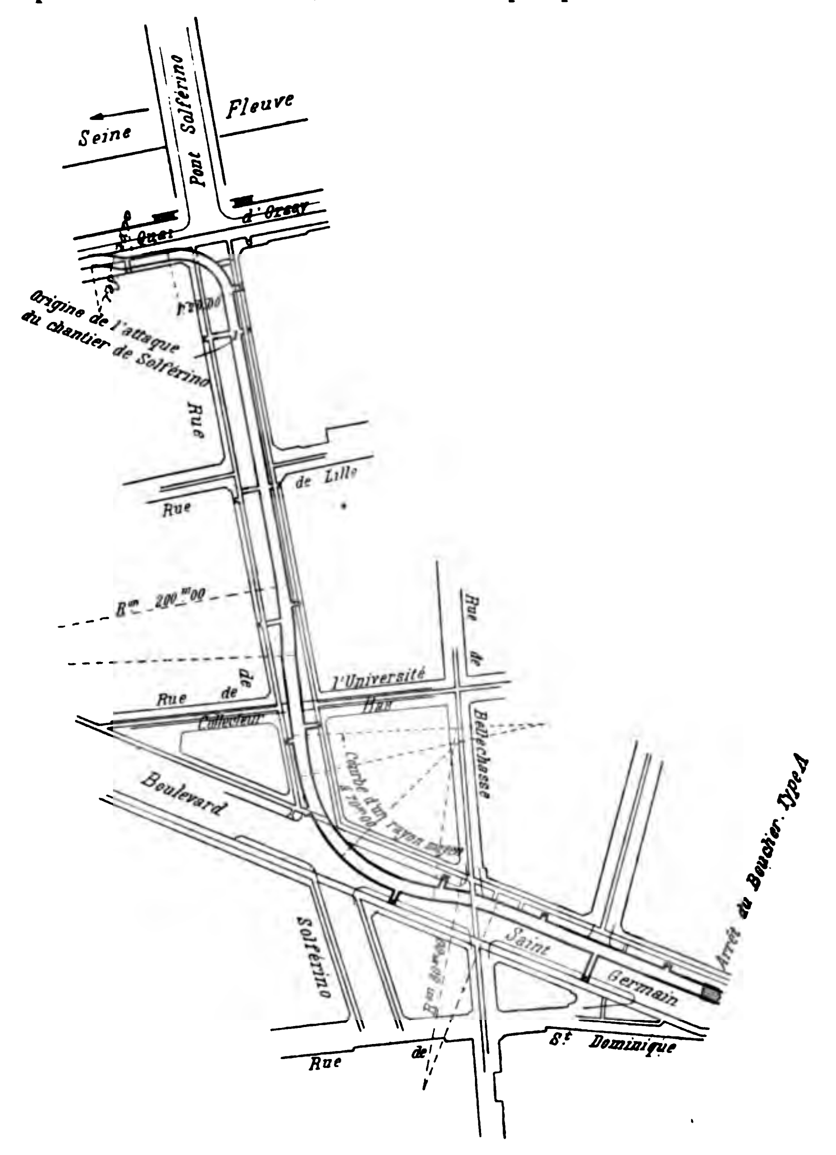


Fig. 94. — Plan du collecteur (chantier Solférino).

tendre facilement brisé par la pioche ; au-dessous régnait une couche de marne. On ne trouva jamais l'eau ; on fut en revanche fréquemment arrêté par d'anciennes maçonneries très résistantes.

Vitesse. — Mise en marche le 5 novembre l'armature fonctionna jusqu'au 1er mars ; pendant ces 115 jours elle parcourut 286,50 m., elle progressa donc avec une vitesse moyenne de 2,50 m. par jour (fig. 95) ; son plus grand parcours hebdomadaire fut de 31 m., correspondant à une vitesse quotidienne de 4,40 m. ; son plus petit de 6 m. soit 0,80 par jour.

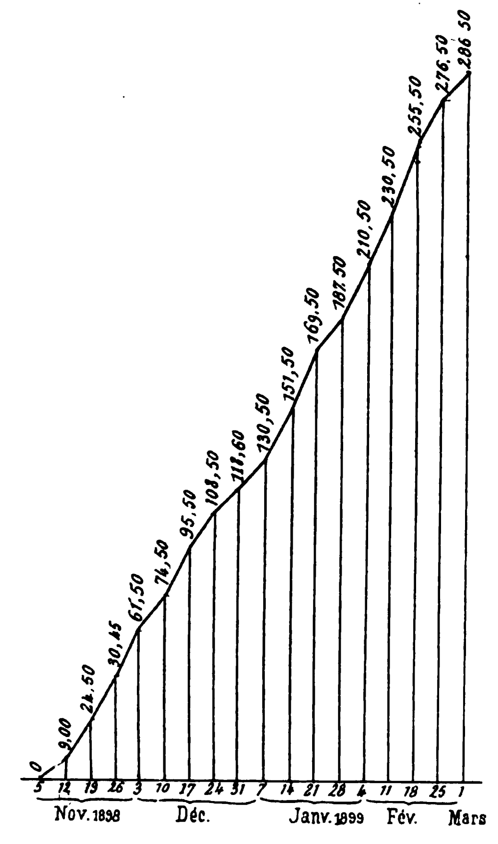


Fig. 95. — Diagramme de marche du bouclier Solférino.

En général on faisait 3 courses par 24 heures ; à la fin, après avoir dépassé la rue de Bellechasse on fit même souvent 4 courses.

Incidents. — Dans la courbe de 200 m. de rayon au point 1061,05, on rencontra à angle droit le collecteur bas qui suit la rue de l'Université ; ce collecteur a 2,10 m. de largeur ; pour le franchir (fig. 96, 97, 98) on lança deux poutres en chêne super-

posées de 40/40 cm d'équarrissage qui servirent à porter les poutrelles d'appui du bouclier.

A droite on longeait un mur parallèle à la marche ; pour éviter que l'armature poussée sur la gauche ne deviât de sa direction on cala fortement les rails et les solives par des étrésillons résistants. Plus loin au passage d'un égout type 10 rencontré en sifflet les couchis non chargés flambèrent, il fallut les étayer.

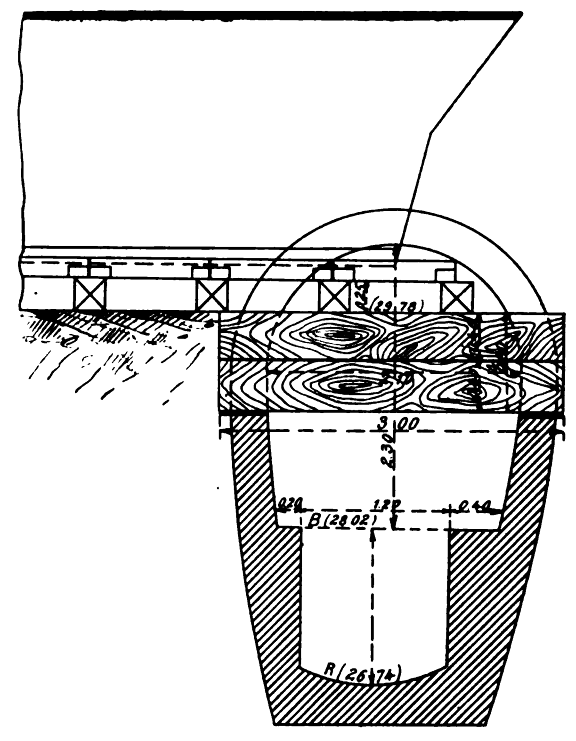


Fig. 96. — Franchissement du collecteur de l'Université. Coupe longitudinale sur l'axe du collecteur de Bièvre.

Le raccordement avec le boulevard Saint-Germain devait se faire par une courbe de 70 m. de rayon et une contre-courbe de 80 m. ; on ne désarticula pas l'armature, il aurait fallu trois jours pour en effectuer le démontage et mouvoir les trois parties les unes par rapport aux autres, on craignit d'ailleurs de l'affaiblir sans arriver à de bons résultats ; on réussit néanmoins à tourner avec un rayon de 63 m. ce qui permit de retrouver

l'alignement droit par une contre-courbe de 70 m. de rayon seulement au coin de la rue de Bellechasse.

Pour regagner la différence de longueur développée des deux parois convexe et concave de l'ouvrage on intercalait entre les

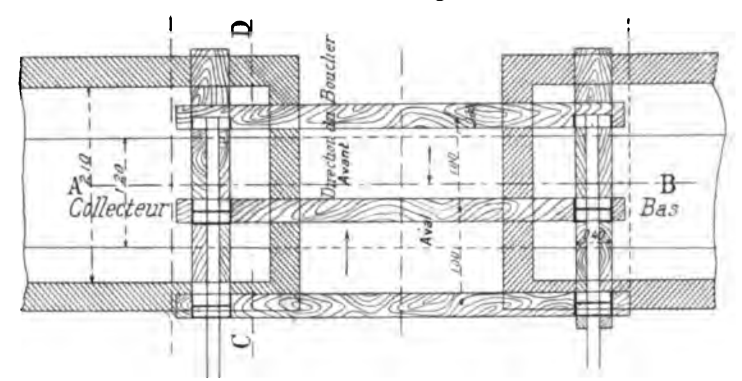


Fig. 97. — Franchissement du collecteur de l'Université. Plan du plancher.

rails des coins en chêne et entre les cintres et la ferme mobile une fourrure en chêne régulièrement amincie de l'extérieur à l'intérieur. Comme les vérins n'avaient que 1,03 m. de course il fallait allonger aussi les manchons d'appui.

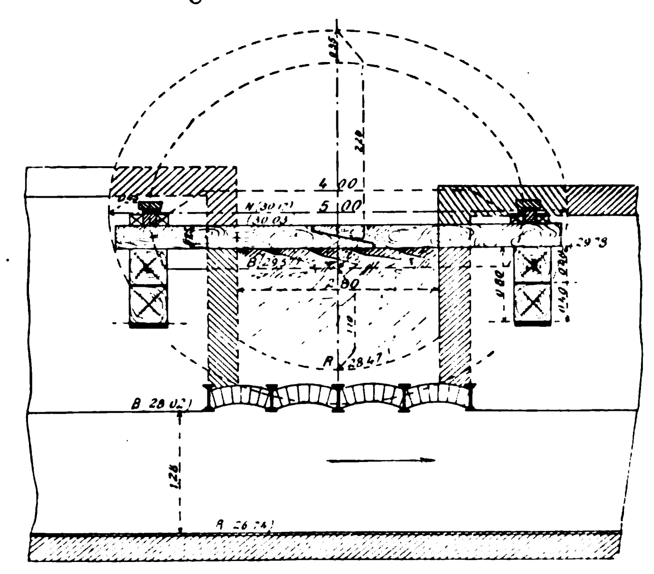


Fig. 98. — Franchissement du collecteur de l'Université. Coupe du plancher transversalement au collecteur de Bièvre.

Il n'y eut pas en général de mouvements dans la chaussée : quand un vide se révélait entre la maçonnerie et le terrain on y enfonçait des planches qui restaient emprisonnées. Pourtant on passa très près du sol, si près qu'en certains points la proximité du pavage empêcha de donner au revêtement son épaisseur normale.

Conclusion. — Le bouclier rencontra le chantier de construction sur bois près de la rue Saint-Dominique au point 833,35, exactement à la position voulue, en hauteur et en plan. Il était encore en très bon état, n'ayant subi ni avaries, ni réparations ; il fut démonté entièrement, la tôle seule resta emprisonnée dans le revêtement ; la ferme d'appui n'était pas endommagée, mais les cintres étaient fort abîmés ; ils fléchissaient tellement sous le poids des maçonneries qu'on était contraint de les étayer.

En résumé l'armature se comporta très bien ; étant donné qu'on ne s'en servit pas, sa division en trois parties indépendantes était inutile ; elle l'alourdissait et l'encombrait sans profit ; c'est avec une juste raison d'ailleurs, qu'on craignit un échec, l'obliquité des efforts aurait fatigué d'autant plus l'appareil qu'il aurait perdu par la désarticulation beaucoup de sa rigidité.

L'appui sur les couchis était une excellente idée qui dans le cas présent réussit parfaitement. En raison de leur très grande surface de frottement et de la charge qu'ils supportaient ils n'avaient que peu de tendances à reculer sous l'effort des presses ; et la maçonnerie était dans de bonnes conditions de prise, les cintres restant immobiles ; quoiqu'on n'ait pas constaté de fissures dans le revêtement, il est toutefois probable qu'en raison de leur élasticité propre les couchis se comprimaient un peu, puis revenaient à leur position primitive dès que les vérins cessaient d'agir.

La course des vérins était un peu trop faible ; quelques centimètres de plus eussent fait gagner du temps en évitant l'emploi de cales dans les courbes de petit rayon.

Enfin la pompe et la dynamo très encombrantes rendaient difficile la vérification du tracé suivi, il fallait ou faire des emprunts, à cause du peu de champ de visée ou effectuer des sondages directs au travers de la chaussée.

BOUCLIER DU MINISTÈRE (CIRCULAIRE)

Bouclier métallique. — Le bouclier employé sur le chantier dit du Ministère étant destiné au percement du collecteur d'après le type B était demi-circulaire. Comme le précédent il sortait de la maison Champigneul. Il se composait (fig. 99, 100 et 101) d'une

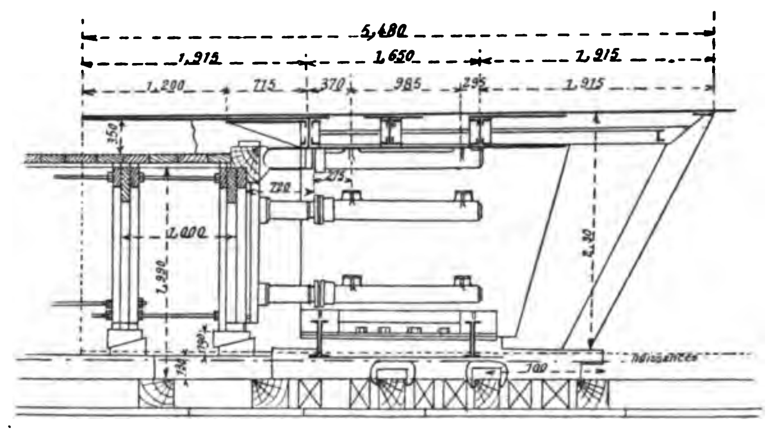


Fig. 99. — Coupe longitudinale du bouclier du Ministère.

tôle de 18 mm. d'épaisseur et 5,480 m. de longueur portée par deux poutres principales demi-circulaires distantes de 1,650 m. ; ces deux poutres formées d'un fer plat et de quatre cornières étaient rivées à leur partie inférieure sur une tôle de 15 mm. d'épaisseur formant une deuxième enveloppe concentrique à la première sur 2,450 m. de longueur ; elles étaient entretoisées au niveau des naissances chacune par deux fers en U démontables de $\frac{200 \times 70}{10}$ portant le plancher inférieur.

Le bouclier, dans sa longueur totale de 5,480 m., était ainsi divisé en trois parties ayant pour longueurs :

La tête 1,915 m. ;

Le corps 1,650 m. ;

La queue 1,915 m.

Dans ce corps douze entretoises groupées 2 à 2 au-dessus des vérins réunissaient les poutres maîtresses sur toute leur hauteur ; une membrure transversale partageait d'ailleurs en deux la longueur de 1,650 m.

La tôle de l'avant-bec découpée en visière renforcée par une

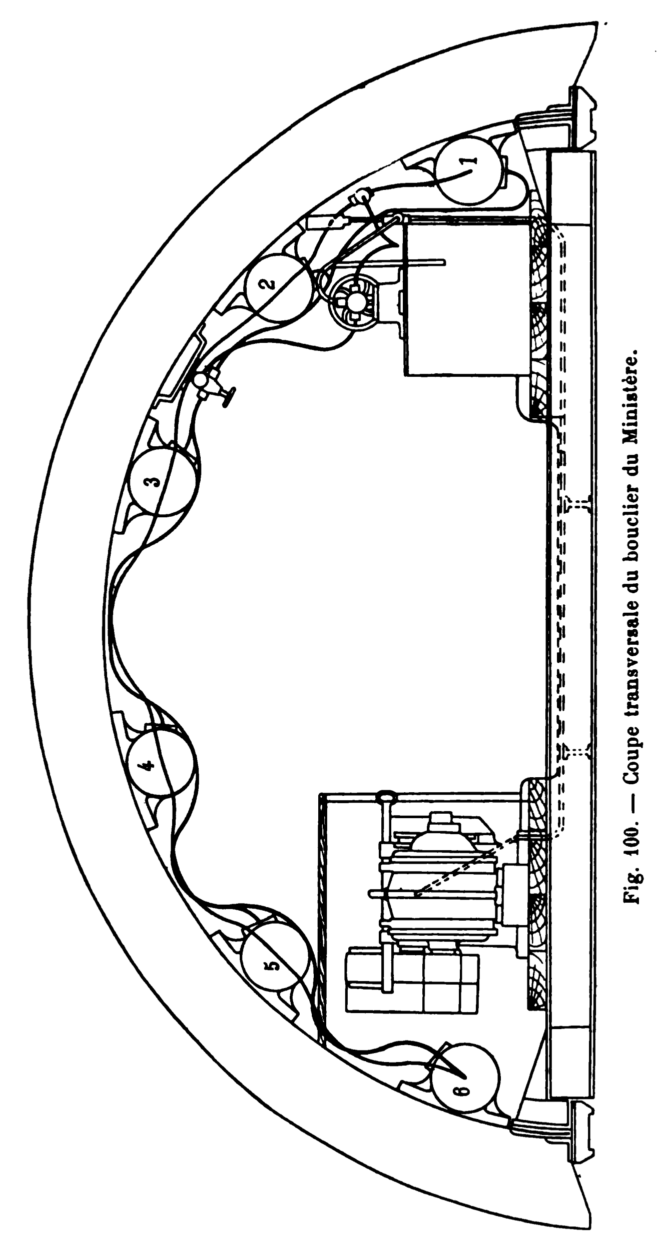


Fig. 100. — Coupe transversale du bouclier du Ministère.

deuxième tôle de 18 mm. sur la moitié de sa longueur environ était soutenue par treize poutrelles terminées en consoles. La tôle

d'arrière enfin taillée carrément et doublée restait libre sur 1,200 m. de longueur appuyée seulement à son talon par treize consoles de 0,715 m. de longueur.

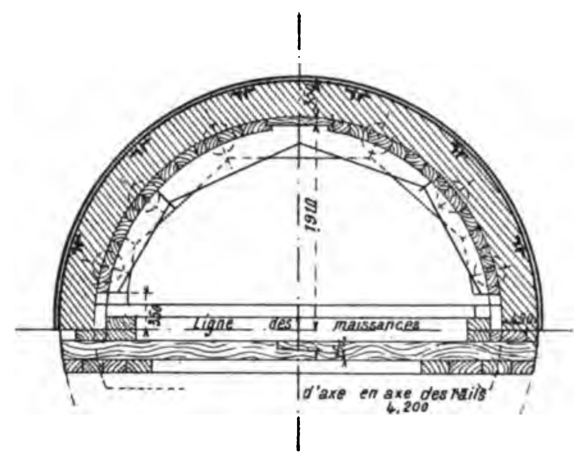


Fig. 101. — Vue arrière du bouclier du Ministère.

La hauteur totale de l'appareil était de 2,30 m., sa largeur de 4,92 m.

Vérins ; fonctionnement. — A part la forme de l'armature, tout ce que nous avons dit du chantier Solférino subsiste ; nous renvoyons donc aux pages précédentes en ce qui concerne le mode et le dispositif de glissement, le nombre et le genre des vérins et des cintres, l'appui sur les couchis et le fonctionnement même de l'engin.

D'axe en axe des rails la distance était de 4,200 m., d'axe en axe des cintres de 1,00 m.

Equipes. — Le chantier comprenait en moyenne :

Un chef mineur et 4 mineurs, 3 terrassiers, 1 mécanicien, 2 aides électriciens, employés à l'abatage et à la conduite de l'armature.

6 manœuvres pour le roulage des wagonnets, 2 maçons et 3 garçons pour l'exécution du revêtement sous la queue.

A l'arrière, l'enlèvement du stross et des piédroits occupait 3 mineurs et 2 terrassiers.

Le revêtement était exécuté par 2 ou 4 maçons aidés de 3 garçons.

Installation mécanique. — Les wagonnets cubaient environ un tiers de mètre cube et pesaient 1 000 kg. ; ils étaient conduits par des hommes à un monte-charge installé devant le Ministère des Travaux publics ; le monte-charge était du système Eydoux ; il était mû par une dynamo Alioth branchée sur le secteur de la rive gauche.

Montage, essais. — Le bouclier fut construit au point 618,00,

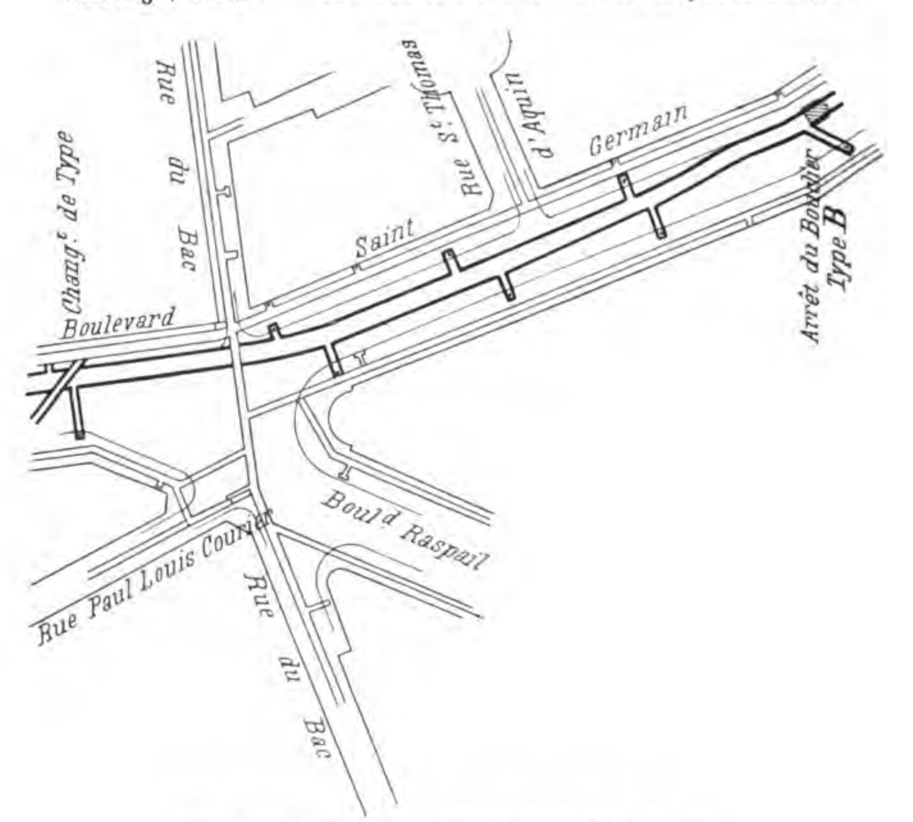


Fig. 102. — Plan du collecteur (chantier du Ministère).

près de la rue du Bac, à 124 m. du puits, dans une chambre boisée de 3 m. $\times$ 7 m. ; le travail commencé en octobre s'acheva à

la fin du mois ; le 4 novembre, après sept jours d'essais, le bouclier avait parcouru 2,50 m.

Il devait suivre une courbe de très grand rayon avec une pente uniforme de 0,275 mm. par mètre (voy. fig. 89 et 102).

Terrains rencontrés. — Le terrain traversé se composait surtout d'un sable de rivière très pur mais ébouleux, qu'on employa à la fabrication du mortier ; à hauteur des banquettes on trouva des bancs de pouddingue de 0,50 m. d'épaisseur ; en dessous, des sables, des graviers, des cailloux et enfin des couches marneuses.

On heurta parfois des roches calcaires peu dures mais le plus souvent on était dans un terrain désagrégé, sans consistance, difficile à maintenir et coupé de vieilles maçonneries. Il n'y avait pas d'eau.

Vitesse. — Le bouclier fonctionna jusqu'au 24 février 1899, parcourant 183,45 m. en 120 jours, soit un peu moins de 1,50 m.

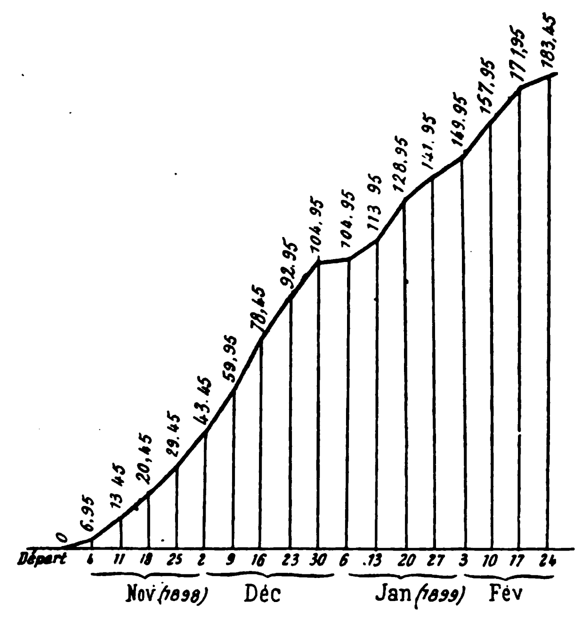


Fig. 103. — Diagramme de marche du bouclier du Ministère.

par jour ; son plus grand avancement hebdomadaire fut de 19 m. correspondant à une vitesse quotidienne de 2,71 m. ; son plus

petit (à part les périodes de réparation) fut de 7 m. soit 1 m. par jour (fig. 103).

Incidents. — Sous la rue du Bac, quinze jours après le départ, le bouclier rencontra et coupa un égout en entraînant des pierres du piédroit; l'égout restant suspendu tassa, une cloche se produisit et monta jusqu'à la chaussée; on ouvrit une tranchée à ciel ouvert, on étaya l'égout sur l'extrados du collecteur construit et on remblaya la cloche.

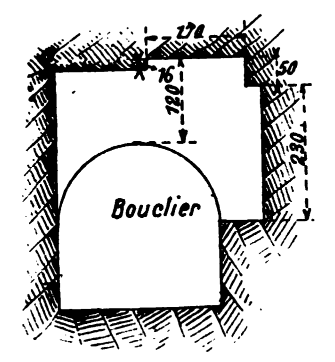


Fig. 104. — Chambre ouverte pour la réparation du bouclier.

Dans les fondations des anciennes rues Saint-Dominique et Taranne, il y eut de fréquentes difficultés pour avancer, on trouvait des caves à demi comblées de gravois qu'il fallait franchir; on dut par exemple lors de la rencontre d'une fosse voûtée monter un mur pour soutenir les semelles du bouclier et un contre-mur pour soutenir la vieille voûte au moment de sa démolition.

A la fin de décembre, en forçant contre des obstacles on tordit l'armature sur son côté droit, on dut pour effectuer la réparation creuser à l'avant une chambre boisée (fig. 104); la marche ne reprit que le 8 janvier; la tôle ne tarda pas d'ailleurs à s'affaisser à nouveau de 12 cm.

Conclusion. — Le bouclier était très fatigué quand on l'arrêta; il était en si mauvais état que sa carrière n'aurait pu se prolonger longtemps; la poutre d'appui et les cintres étaient hors d'usage.

Ceci tint peut-être à ce que l'armature était moins solidement construite, et moins bien dirigée que celle du chantier Solférino, ce fut surtout la conséquence des mauvais terrains rencontrés; très souvent pour maintenir le sol il fallait sous la tôle de l'avant-bec enfoncer une couronne de palplanches de 70 à 80 cm. de longueur, parfois même on recourut à l'emploi d'un masque.

Tout ce que nous avons dit du premier bouclier s'applique d'ailleurs à celui-ci.

Le bouclier circulaire était légèrement plus petit que le bouclier elliptique ; pour réaliser l'épaisseur normale du revêtement il fallait bloquer la maçonnerie contre la tôle, ce qui n'est pas à recommander.

DEUXIÈME LOT

BOUCLIER DIOUDONNAT (CIRCULAIRE)

Dans le deuxième lot, un seul bouclier fut mis en service par l'entrepreneur M. Dioudonnat ; il était destiné à la construction du collecteur suivant le type B et par suite demi-circulaire ; il avait été construit dans les ateliers de MM. Baudet, Donon et compagnie pour la partie métallique, de M. Moranne jeune pour les vérins et pour la machinerie.

Bouclier métallique. — L'armature (fig. 105 et 106) se composait essentiellement d'une tôle de 14 mm. d'épaisseur et de 4,070 m. de

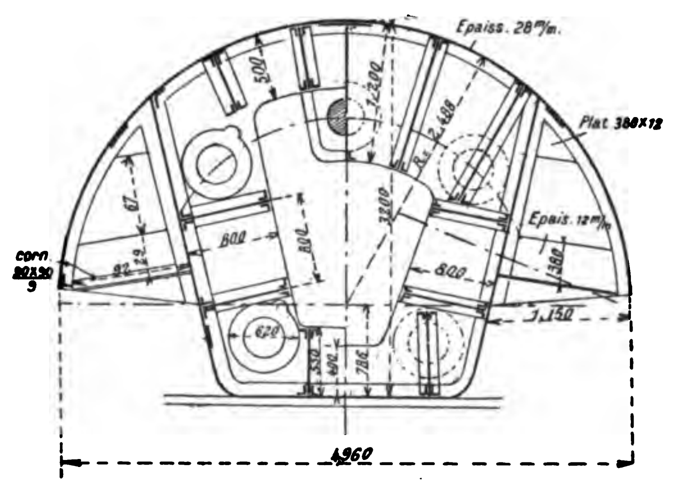


Fig. 105. — Coupe transversale du bouclier Dioudonnat.

longueur enroulée suivant la forme de l'extrados du collecteur et descendant à 10 cm. au-dessus des naissances ; elle était supportée par deux poutres maîtresses distantes de 1,445 m. d'axe en axe. La poutre d'avant était formée d'une traverse circulaire supé-

rieure haute de 1,20 m. de deux montants inclinés de 800 mm. de largeur et d'une traverse inférieure horizontale de 400 mm. de

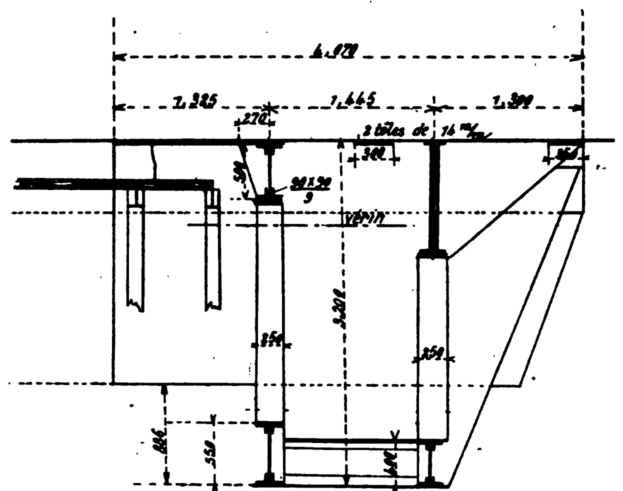


Fig. 106. — Coupe longitudinale du bouclier circulaire.

hauteur. Le vide central avait 1 m. de largeur environ et 1,60 m. de hauteur sous clef.

La poutre arrière avait même forme mais la traverse circulaire supérieure n'avait que 500 mm. de hauteur, tandis que la traverse inférieure horizontale avait 550 mm; l'espace libre central était ainsi de 2,15 m. de hauteur, et de 2 m. de largeur.

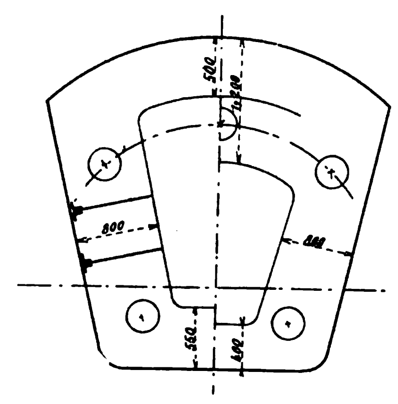


Fig. 107. — Forme primitive du bouclier.

La largeur de ces poutres étant inférieure à celle de la section l'enveloppe restait en porte à faux de 1,150 m. de chaque côté soutenue par des consoles et raidie par des cornières.

Le plancher inférieur descendait à 78,6 cm. au-dessous des naissances.

Onze entretoises réunissaient les deux poutres sur toute leur hauteur.

L'armature se trouvait donc partagée en trois parties :

L'avant-bec de 1,300 m. de longueur ;
Le corps de 1,445 m. ;
La queue de 1,325 m. ;

La tôle d'avant-bec était soutenue jusqu'à son extrémité par cinq consoles de 1,20 m. de hauteur; celle de la queue doublée sur toute sa longueur et libre sur 1,15 m. était renforcée par cinq consoles de 0,27 m. de longueur.

La hauteur totale de l'appareil était de 3,200 m., sa largeur de 4,960 m.

L'armature avait d'abord été construite avec une enveloppe extérieure limitée à la largeur des poutres principales (fig. 107) ; mais avant la mise en service on ajouta les tôles latérales descendant à 10 cm. au-dessus du niveau des naissances; soit à 0,89 au-dessus du plancher inférieur de glissement. Dans ces parties latérales les deux consoles d'appui (fig. 108), prolongeant les poutres maîtresses étaient entretoisées par des cornières de $\frac{70 \times 70}{9}$ disposées en croix.

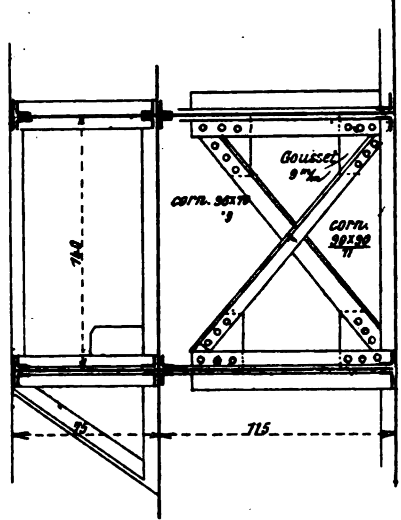
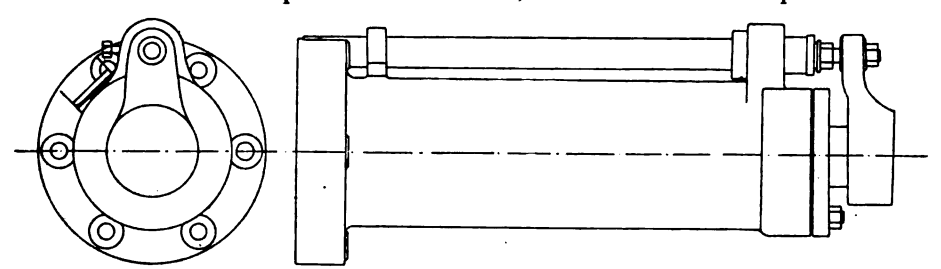


Fig. 108. — Détails des supports des tôles ajoutées.

Vérins. — Les vérins (fig. 109) étaient au nombre de cinq, dont deux au niveau du plancher inférieur ; ils étaient fixés à la poutre


Fig. 109. — Élévation longitudinale et vue en bout d'un vérin.

d'avant et traversaient celle d'arrière, sauf le vérin de clef qui seul était suspendu par une cornière.

Leur longueur totale était de 1,595 m., les pistons avaient 160 mm. de diamètre et 1 m. de course; les vérins de rappel avaient 78 mm. de diamètre extérieur et leurs axes étaient distants de 270 mm. de ceux des vérins principaux. Enfin le diamètre des têtes d'appui était de 250 mm.

Sous la pression de 160 kg. par centimètre carré les vérins exerçaient un effort de 40 t. chacun, soit 200 t. pour l'ensemble.

Appui. — Les vérins prenaient appui sur une charpente composée de quinze fermes en bois de chêne entretoisées; chaque

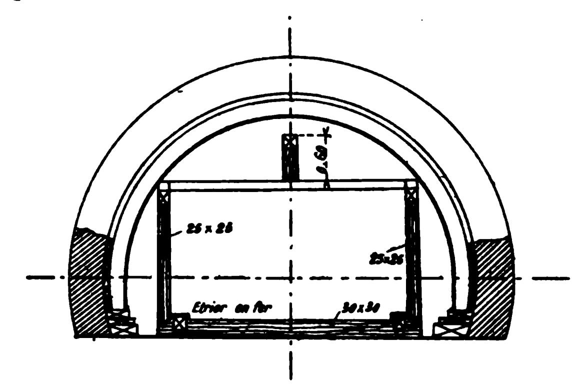


Fig. 110. — Elévation d'une ferme de la charpente d'appui.

ferme (fig. 110) était formée d'une pièce inférieure de 30/30 cm. d'équarrissage de 2,60 m. de longueur portant à ses deux extrémités deux montants verticaux de 1,60 m. de hauteur; un fer en U transversal réunissait les extrémités de ces deux pièces et portait en son milieu un buton vertical de 0,60 m. de hauteur.

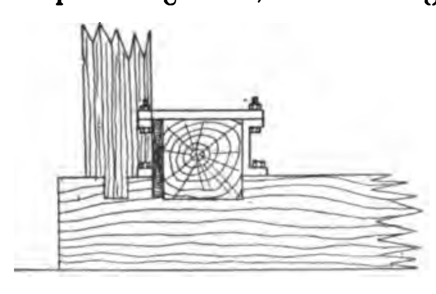


Fig. 111. — Détail d'assemblage.

Les fermes étaient entretoisées par cinq longrines longitudinales placées au droit des axes des cinq presses : deux fixées par des armatures de fer aux traverses inférieures, deux en haut des montants latéraux, une à l'extrémité du buton central.

La dernière ferme était solidement ancrée dans la maçonnerie

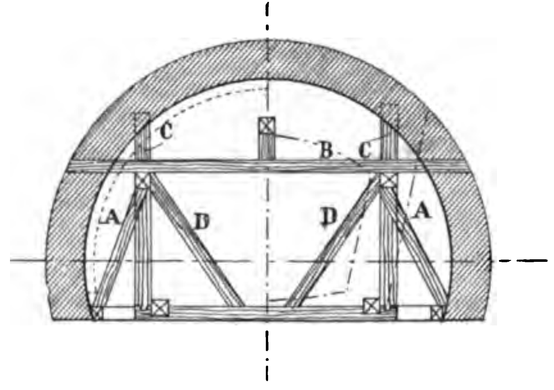


Fig. 112. — Vue arrière de la dernière ferme d'appui.

par les traverses horizontales supérieure et inférieure et les deux montants verticaux ; en outre elle était contreventée par deux

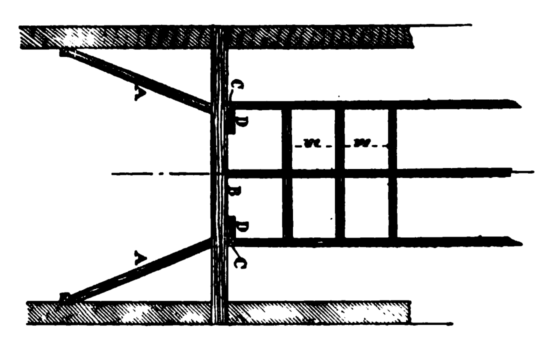


Fig. 113. — Charpente d'appui. Plan.

longues pièces A, A et deux plus petites DD (fig. 112, 113).

Les cintres (fig. 114) étaient en fer ils descendaient jusqu'à 0,50 m. en dessous des naissances et étaient formés d'un fer à T rivé dans un fer en U de $\frac{140 \times 60}{10}$. Intercalés entre les fermes de la charpente et sans aucune relation avec elles, ils n'étaient soutenus que par leurs calages.

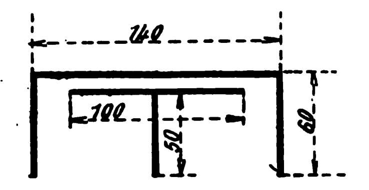


Fig. 114. — Coupe d'un cintre métallique.

Machinerie. — La dynamo et le chariot des pompes n'étaient

pas logés dans l'armature ; ils étaient placés au delà de la charpente d'appui à 20 m. en arrière ; un tube de cuivre de cette longueur réunissait les pompes (à trois corps) aux vérins. Quand le bouclier avançait, il fallait que ce tube s'allongeât d'autant, on avait fixé son extrémité non pas directement au chariot des pompes mais à un piston mobile dans un cylindre de 1 m. de longueur.

Après chaque course on reportait la machinerie en avant.

Montage et essais. — Le montage s'effectua devant la statue de Danton, sur le boulevard Saint-Germain ; on avait recouvert la chambre d'un platelage pour ne pas interrompre la circulation ; le terrassement fut commencé le 5 juillet 1898, à midi ; le 26, on approvisionnait les pièces de l'armature mais c'est seulement le 15 septembre qu'eut lieu la première course à blanc.

Une grève générale s'étant déclarée, les chantiers abandonnés ne furent repris que le 12 octobre.

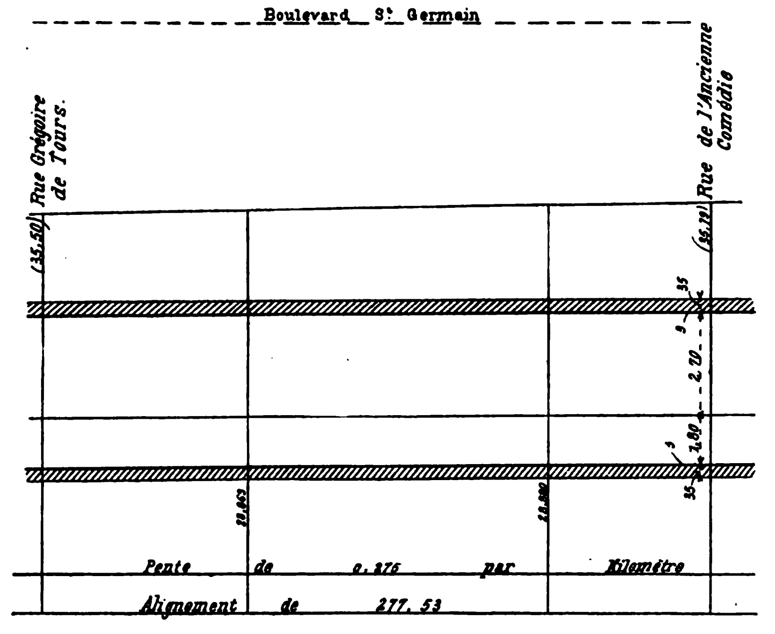


Fig. 115. — Profil en long du 2e lot du collecteur sur le parcours du bouclier.

Tracé en plan et profil en long. — En profil en long (fig. 115)

le tracé de l'ouvrage présentait une pente uniforme de 0,275 mm. par mètre.

En plan (fig. 116) une seule courbe de 50 m. de rayon sur 15,88 m. de longueur interrompait l'alignement droit général.

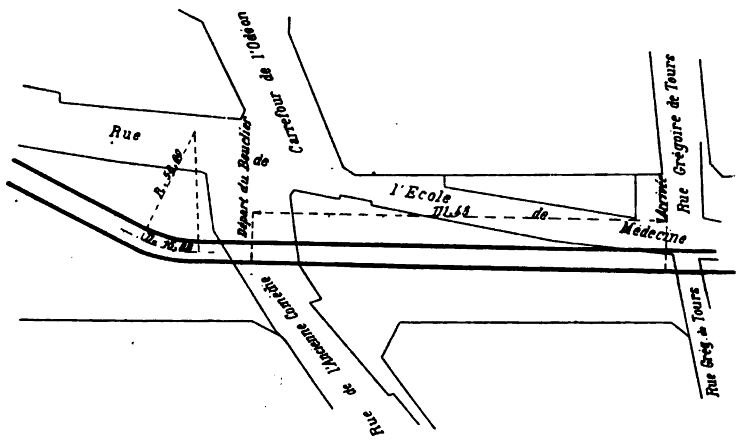


Fig. 116. — Plan du 2e lot sur le parcours du bouclier.

Fonctionnement. — Le bouclier reposait sur un plancher formé de madriers transversaux de 8/22 cm. × 4 m. de longueur liés par des fers recourbés à leurs extrémités et embrassant trois madriers à la fois ; la pression se trouvait ainsi répartie sur une largeur de 4 m. ; en raison de la mauvaise qualité des terrains rencontrés, c'était encore insuffisant, mais la faible longueur de l'avant-bec 1,30 m. ne permettait pas la pose de longrines longitudinales pour former grillage.

La charpente d'appui ne comprenait que 15 fermes ; comme on ne pouvait ancrer les longrines horizontales dans de la maçonnerie fraîche ; dès qu'on avait parcouru 7 m. on démontait l'ancrage pour l'avancer d'autant, il y avait ainsi toujours 7 m. entre le point d'appui et la tôle d'arrière, mais tous les cinq jours on arrêtait le chantier pour effectuer ce changement de butée.

Les vérins avaient 1 m. de course, mais on ne progressait guère que de 0,90 m. à chaque fois, en raison de la compression éprouvée par tous les bois ; il fallait donc effectuer chaque course en deux fois ; puisque les cintres étaient indépendants de la charpente, ceci n'avait d'autre inconvénient que de perdre du temps.

On laissait un vide de quelques centimètres entre la tôle de la queue et l'extrados du revêtement pour éviter l'arrachement du dernier anneau construit ; on bourrait ce vide en mortier fin avec des battes en bois ; plus tard d'ailleurs on fit des injections de ciment sous pression.

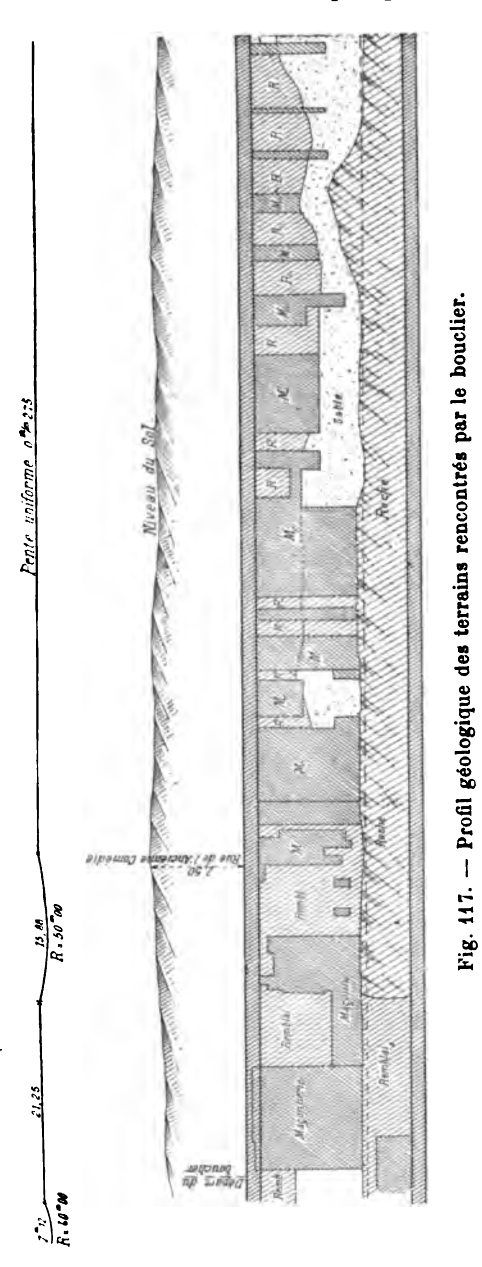


Fig. 117. — Profil géologique des terrains rencontrés par le bouclier.

Personnel. — Le chantier comprenait :

3 mineurs pour l'avancement et la pose des butées ;

6 terrassiers pour le chargement, le roulage et le montage des déblais ;

4 maçons pour l'exécution de la voûte ;

7 garçons pour le service des maçons et la descente des matériaux ;

2 mécaniciens et 2 électriciens dirigeant la marche du bouclier et les engins de montage.

Terrains rencontrés. — Le terrain dans lequel fonctionne l'armature se composait de remblais, d'abord ; puis de sables jaunes sous une couche de remblais. En dessous, pour la construction des banquettes et du radier, on travailla presque partout dans la roche.

Ce qu'il importe de signaler c'est qu'on rencontra continuellement des murs de fondation, des caves, des fosses qu'il était très difficile de traverser sans accidents ; le profil géologique ci-contre (fig. 117) donnera une idée de la multiplicité des maçonneries rencontrées.

Vitesse. — L'armature fonctionna jusqu'au 7 février 1899. Ce jour-là à 10 heures elle fut arrêtée à la rencontre du chantier de construction sur bois près de la rue Grégoire-de-

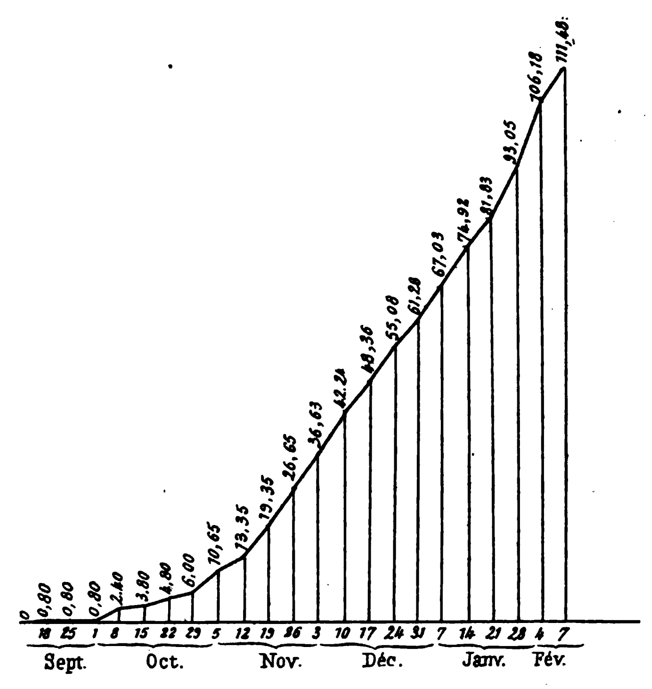


Fig. 118. — Graphique de marche du bouclier Dioudonnat.

Tours. Elle parcourut 111,48 m. (plus l'emplacement de la chambre de montage). Le chantier eut une durée de 143 jours, mais déduction faite des chômages et des arrêts pour changement de butée, il n'y eut que 89 jours de travail effectif ; la vitesse moyenne quotidienne fut donc de 1,30 m. La plus grande vitesse fut de 2,20 m. le 8 janvier, la plus petite de 0,10 m. le 3 novembre.

Incidents. — Dès le départ, l'armature rencontra une vaste fosse remplie de déblais encore meubles, où elle s'enfonça de 0,20 m. ; on chercha à la relever par un plancher formé de planches en chêne de 0,06 m., reliées par des chevilles et des fers plats établis suivant une pente de 0,05 par mètre sur 4 mètres ; mais le tassement s'accentua de 3 cm. ; c'est en vain qu'on creusa une fouille de 0,30 m. de profondeur et qu'on la remplit de béton ; l'engin descendant encore de 5 cm. le dernier anneau de maçonnerie exécuté fut brisé, la chaussée s'effondra ; on dut ouvrir une chambre à ciel ouvert et remonter l'appareil de quelques centimètres au-dessus de sa cote théorique.

Pour retenir les gravois, on formait à l'avant un ciel mobile avec des feuillards enfoncés entre la tôle d'avant-bec et un fer en U parallèle ; mais la poussée des terrains déformait le dispositif qui ne pouvait plus rentrer sous l'enveloppe ; il fallut renoncer à cet artifice.

En général, pour éviter la formation de cloches sous le macadam, on démontait la chaussée à l'avant pour la refaire à l'arrière ; la circulation était ainsi interdite sur une longueur de 20 m. environ et sur une largeur de 5 m.

La courbe de 50 m. de rayon fut facilement exécutée en interposant des cales entre les butées et les vérins.

Conclusion. — Le bouclier et la ferme d'appui étaient encore en bon état quand le travail s'acheva.

La forme donnée aux poutres maîtresses laissait une très faible section libre ; quoique le déblai fut exécuté jusqu'à 0,80 en dessous des naissances, on avait dû renvoyer la machinerie à l'arrière ; c'était évidemment une fausse manœuvre que de transporter après chaque course les pompes et la dynamo.

L'indépendance des cintres et des fermes d'appui des presses a donné de bons résultats en diminuant les chances de décollage du dernier anneau de maçonnerie exécuté.

Mais la butée était en elle-même défectueuse, le report de l'appui, en avant, arrêtait le chantier, or en raison du petit nombre de fermes (15) cette opération se renouvelait tous les

cinq jours environ et elle eut été encore plus fréquente si la vitesse avait été plus grande.

Plus courte que celle du 1er lot l'armature tournait avec plus de facilité, elle put décrire une courbe de 50 m. de rayon sans difficulté.

La vitesse d'avancement fut très faible, mais ceci tint à la présence continuelle sous le couteau de vieilles maçonneries qu'il fallait ou soutenir, ou bourrer, ou démolir ; dans un pareil terrain le rendement d'une armature métallique ne pouvait être qu'extrêmement faible.

CHAPITRE V

CHEMIN DE FER MÉTROPOLITAIN DE PARIS

I. — INTRODUCTION

Exposé. — Depuis 1856 (projets Braine et Flachat) la question de l'établissement dans Paris d'un chemin de fer métropolitain était à l'étude. L'encombrement actuel des voies principales et même des voies secondaires, d'une part ; la nécessité de pourvoir à un mouvement intense de circulation pendant l'Exposition universelle de 1900, d'autre part, ont montré de quelle utilité incontestable pourrait être un réseau de voies ferrées judicieusement établi ; et aujourd'hui les projets tant de fois abandonnés ou remaniés sont définitivement adoptés et en pleine période d'exécution.

Une décision du 22 novembre 1895 a reconnu au métropolitain le caractère de chemin de fer d'intérêt local ; une loi du 30 mars 1898 l'a déclaré d'utilité publique et a autorisé la Ville à pourvoir à l'exécution et à l'exploitation du réseau dans les conditions de la loi du 11 juin 1880, du règlement du 6 août 1881, du cahier des charges et de la convention passée par la Ville avec le concessionnaire chargé d'assurer le service.

Les bases des études ont été celles-ci :

Largeur maxima du matériel, 2,40 m. ; distance minima entre les parapets ou constructions et le matériel sur 2 m. de hauteur au moins, 0,70 m.; largeur de la voie, 1,44 m.

La Ville établit l'infrastructure : tunnels, tranchées et viaducs ; la superstructure : installation des voies et des transmissions, aménagement des accès et des stations, création et organisation des usines... est à la charge de la Compagnie concessionnaire dite « Compagnie du Métropolitain de Paris ».

La durée de la concession est de trente-cinq années : la Ville n'accorde ni subvention ni garantie d'intérêt.

Le réseau entier a été partagé en un certain nombre de fractions qu'on exécutera successivement ; le délai limite de livraison de l'ensemble est de treize années, il prend fin le 30 mars 1911 ; dix mois après la réception d'une ligne, le concessionnaire, sous peine de déchéance, doit l'avoir livrée à l'exploitation.

Du tracé. — En plan, le rayon minimum des courbes est de 75 m., un palier de 50 m. de longueur au moins sépare toujours deux courbes de sens contraires ; en profil, la déclivité maxima est de 4 mm. par mètre, un palier de 50 m. de longueur minima séparant une pente de la rampe suivante ; il n'y a nulle part de traversée à niveau.

La longueur totale du réseau concédé est de 64 697,50 m., y compris les raccordements. Comme il y a peu de rues dans Paris où l'on puisse ouvrir une tranchée en laissant à la circulation une surface libre suffisante de chaussée et de trottoirs, la majeure partie du tracé est établie en souterrain ; une très petite longueur est prévue en viaduc.

Les chiffres suivants donnent d'ailleurs la proportion de chacun des trois types : souterrain, viaduc, tranchée :

Souterrain	0,701
Viaduc	0,136
Tranchée	0,163
Total	1,000

Fraction en cours d'exécution. — La Ville doit, avant le 30 mars 1906, livrer au concessionnaire une longueur d'au moins 42 km. à double voie ; cette section a été divisée en deux fractions :

Première fraction. — De la porte de Vincennes à la porte Dauphine et à la porte Maillot ;

Deuxième fraction. — Suivant le périmètre des anciens boulevards extérieurs.

La première fraction seule (fig. 119) est en cours d'exécution, dans le but de faciliter l'accès de l'Exposition universelle de 1900 ;



Fig. 119. — Plan général de la fraction du métropolitain en cours d'exécution.

on y a joint le tronçon de la deuxième, compris entre la place de l'Étoile et la place du Trocadéro.

Section transversale. — Sauf la traversée du canal Saint-Martin qui s'effectue à ciel ouvert, toute cette première fraction est souterraine.

Les ouvrages voûtés qui sont les seuls dont nous nous occupons ici sont de trois types : le souterrain à une voie, le souterrain à deux voies et les stations.

1° *Souterrain à une voie.* — La largeur est de 3,90 m. au niveau du rail, de 4,30 m. au niveau des naissances, c'est-à-dire à 1,85 m. au-dessus du rail ; les piédroits ont 2,52 m. de hauteur, ils sont circulaires, avec un rayon de 8,75 m. ; l'intrados

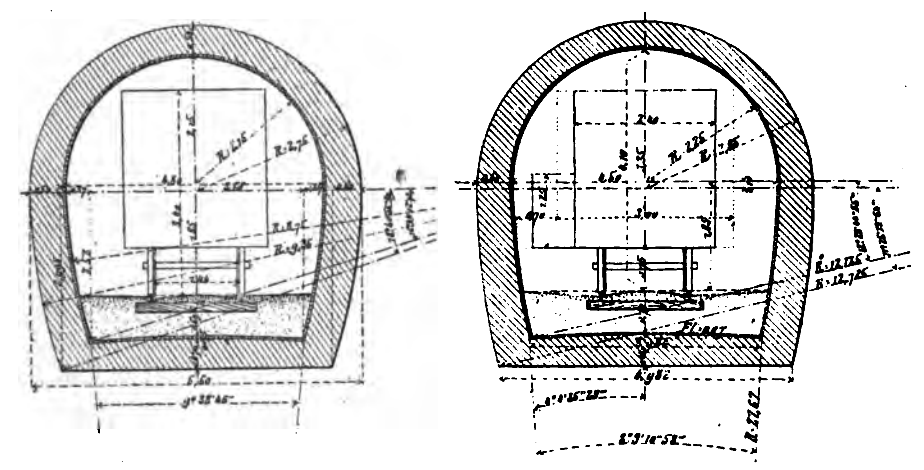


Fig. 120. — Section normale à une voie.

Fig. 121. — Section à une voie élargie.

de la voûte a 2,15 m. de rayon ; le radier est convexe, suivant un arc de cercle de 21,17 m. de rayon et 0,075 m. de flèche (fig. 120).

Les épaisseurs sont :

Pour le radier	0,475
Pour les piédroits uniformément.	0,60
Pour la voûte 0,50 m. en clef, 0,60 m. aux naissances.	

Les dimensions extérieures extrêmes sont :

Hauteur	5,670 m.
Largeur	5,50

Ce type ne sert qu'au raccordement des différentes voies entre elles. Dans les stations terminus où le rayon des courbes est de 30 m., on l'a modifié (fig. 121) de telle sorte que le matériel y puisse passer.

2° *Souterrain à deux voies.* — Le souterrain à deux voies est le type courant (fig. 122). La largeur est de 6,60 m. au niveau des

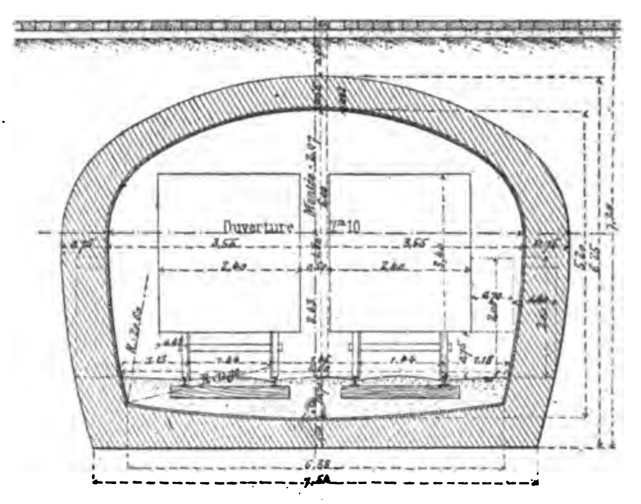


Fig. 122. — Souterrain à 2 voies (section normale).

rails, de 7,10 m. au niveau des naissances, c'est-à-dire à 2,43 m. plus haut ; le radier est concave, suivant un arc de 20,60 m. de rayon ; les piédroits sont circulaires, avec un rayon de 11,935 m. ; la voûte est elliptique, sa montée est de 2,07 m.

Les épaisseurs sont :

Pour le radier, sur l'axe	0,50
Pour les piédroits uniformément	0,75
Pour la voûte à la clef.	0,55

La hauteur totale intérieure sur l'axe de l'ouvrage est de 5,20 m. Les dimensions extérieures extrêmes sont : hauteur 6,25 m., largeur 8,60 m.

Un enduit continu de 0,02 m. d'épaisseur revêt la section intérieure.

Pour les courbes de moins de 100 m. de rayon, il a fallu élargir ce type et lui donner 7,36 m. aux naissances pour faciliter la circulation des trains (fig. 123 et 124).

Des niches disposées en quinconce et espacées de 25 m. d'axe en axe sont réservées dans les piédroits; leur largeur est de 1,50 m. et leur hauteur de 2 m. au-dessus du rail.

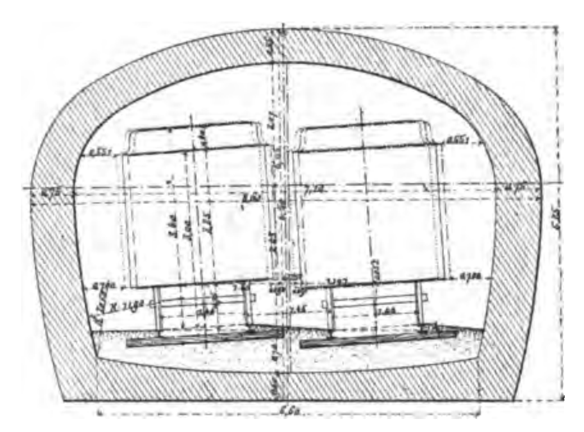


Fig. 123. — Souterrain à 2 voies (section pour rayons de 75 m.).

3° *Stations voûtées.* — La largeur intérieure est de 14,14 m. au niveau des naissances, soit à 1,50 au-dessus du rail, le radier est

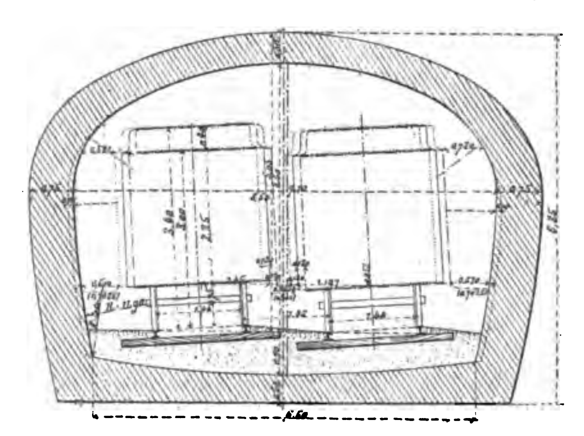


Fig. 124. — Souterrain à 2 voies (section pour rayons de 100 m.).

une demi-ellipse de 2,20 m. de demi petit axe ; la voûte, elliptique aussi, a 3,50 m. de montée (fig. 125).

Les épaisseurs sont :

Pour le radier sur l'axe	0,50 m.
Pour les piédroits	2,00
Pour la voûte à la clef	0,70

Le radier est recouvert d'un enduit de 0,02 ; au-dessus des

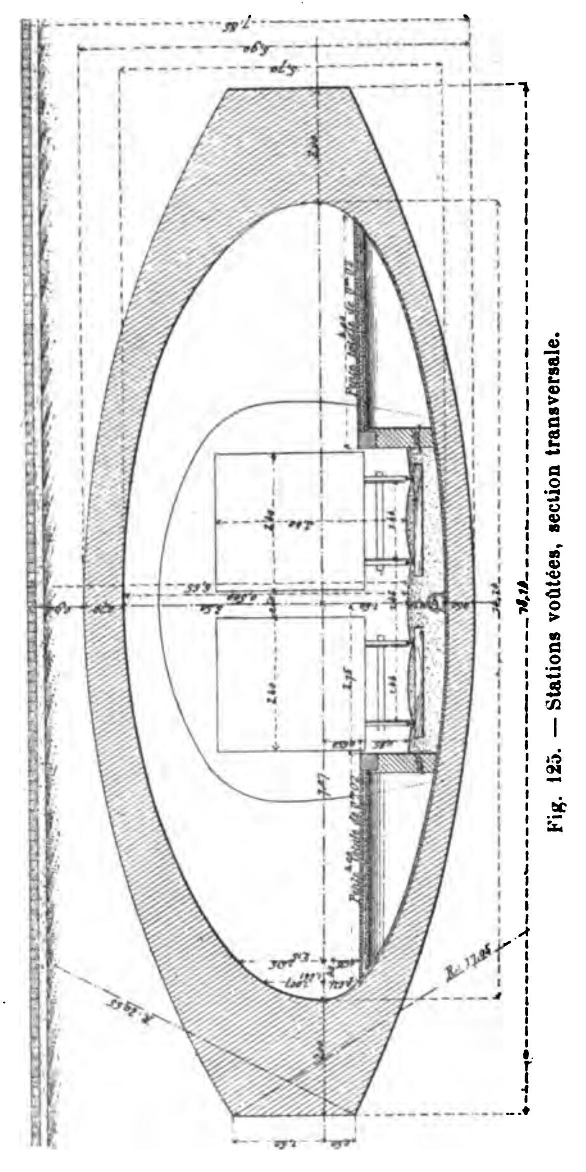


Fig. 125. — Stations voûtées, section transversale.

quais le revêtement est en briques ou carreaux blancs émaillés. La hauteur totale intérieure est de 5,70 m. sur l'axe.

Les dimensions extérieures extrêmes sont : hauteur 6,90 m. ; largeur 18,14 m.

Exécution des travaux. — La fraction en construction d'une lon-

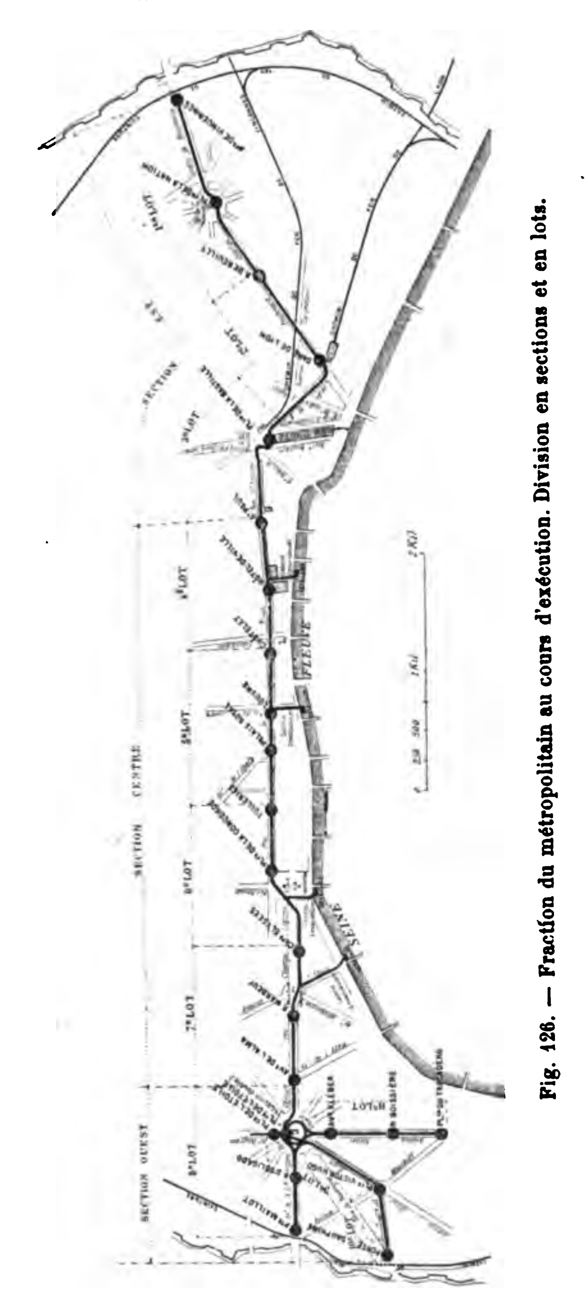


Fig. 126. — Fraction du métropolitain au cours d'exécution. Division en sections et en lots.

gueur totale de 13976,24 m. (fig. 126) a été divisée en 11 lots

répartis en 3 sections : de l'Est, du Centre et de l'Ouest. Dix de ces lots ont été confiés à des entrepreneurs ; le 1er a été exécuté directement par la ville, en régie.

I. — *De la porte de Vincennes à la porte Maillot*

Nos des lots	Limites des lots	Long. des lots
1.	De la porte de Vincennes à la rue de Neuilly.	1 789,83
2.	De la rue de Reuilly à la rue Lacuée.	1 335,54
3.	De la rue Lacuée à la station Saint-Paul	1 137,18
4.	De la station Saint-Paul inclusivement à la station du Châtelet.	1 161,62
5.	De la station du Châtelet inclusivement à celle des Tuileries.	1 328,50
6.	De la station du Châtelet inclusivement à celle des Champs-Elysées	1 236,22
7.	De la station des Champs-Elysées inclusivement à celle de l'avenue de l'Alma inclusivement	1 176,05
8.	De la station de l'avenue de l'Alma exclusivement à la porte Maillot.	1 406,84
	II. — *De la place de l'Etoile à la porte Dauphine*	
9.	De la station de la place de l'Etoile inclusivement à celle de la place Victor-Hugo.	1 084,54
10.	De la station de la place Victor-Hugo inclusivement à celle de la porte Dauphine	755,22
	III. — *De la place de l'Etoile au Trocadéro*	
11.	De la station de la place de l'Etoile, inclusivement à celle du Trocadéro inclusivement.	1 564,70
	Total	13 976,24

Par jour de retard sur la date fixée pour la livraison de leur lot les entrepreneurs subiront une retenue de 2000 fr. ; par contre, ils toucheront une prime de 2000 fr. par jour d'avance.

Dépenses prévues. — La dépense totale pour les 11 lots est évaluée à 36941000 fr. se décomposant ainsi :

Travaux d'infrastructure y compris surveillance et somme à valoir.	30 500 000
Travaux accessoires : galeries d'évacuation, déviations d'égouts et de conduites d'eau . .	5 041 000
Frais généraux de direction et de personnel . .	1 400 000
Total	36 941 000

La dépense par kilomètre est donc de

$$\frac{36\,941\,000}{1\,397\,621} = 2\,643\,174 \text{ fr.}$$

Importance des déblais à extraire. — Le cube de déblais à extraire est en moyenne de 70 m³ par mètre courant, en tenant compte du foisonnement, soit un million environ de mètres cubes pour l'ensemble de la fraction; il ne fallait pas songer à transporter par tombereaux à travers la ville cette masse énorme de terre. D'une part, les rues de Lyon, Saint-Antoine et Rivoli sont déjà fort encombrées, d'autre part, la place de la Concorde et l'avenue des Champs-Élysées sont des voies de luxe qu'on ne voulait pas déparer par la circulation continuelle de lourds véhicules.

Pour les 5 lots du Centre, on décida l'enlèvement des déblais en dehors de la voie publique.

Pour le 3ᵉ : au moyen de bateaux par le canal Saint-Martin que le tracé rencontre à ciel ouvert.

Pour les 4ᵉ, 5ᵉ, 6ᵉ et 7ᵉ lots : par des galeries construites spécialement à cet effet et reliant le Métropolitain à des estacades en charpente établies sur les berges de la Seine : le déchargement se fait alors directement dans les bateaux porteurs.

Les 4 galeries sont creusées :

Sous la rue Lobau, près de l'Hôtel de Ville, sous la rue du Louvre, sous la place de la Concorde et sous l'avenue d'Antin, en partant du Rond-Point des Champs-Élysées.

Pour les autres lots, on a choisi des points d'accès facile, en des rues larges ou peu fréquentées et on y a installé les puits d'extraction, les monte-charges et les estacades de déchargement dans les tombereaux.

Les emplacements adoptés furent primitivement ceux-ci :

1ᵉʳ lot : place de la Nation;

2ᵉ lot : boulevard Diderot, à l'emplacement de l'ancienne prison Mazas ;

8ᵉ lot : avenue de la Grande-Armée, près de la porte Maillot ;

10ᵉ lot : porte Dauphine ;

9ᵉ et 11ᵉ lots : place de l'Étoile, au coin de l'avenue de la Grande Armée.

Aux termes de leur marché, les entrepreneurs ne devaient avoir de puits d'extraction ou d'accès qu'aux endroits énumérés ci-dessus.

Nous verrons plus loin quel tempérament on dut apporter en exécution à ces mesures un peu rigoureuses.

Procédés d'exécution. — Dans l'espoir de ne pas entraver la circulation, on imposa aux entrepreneurs l'emploi de boucliers, en leur laissant le choix du système à adopter sous réserve de l'approbation de l'Administration; les entrepreneurs étaient d'ailleurs responsables des accidents et des dommages que leur façon d'opérer entraîneraient pour les immeubles voisins et tous ouvrages publics ou privés.

Le bouclier ne fut employé que pour la section courante à deux voies; la section à une voie et les stations voûtées étaient établies par les procédés ordinaires de boisage; les raccordements avaient des longueurs trop peu importantes et leur tracé en plan est trop sinueux pour que l'emploi d'un bouclier fût avantageux pour leur établissement; quant aux stations voûtées elles ont une très grande largeur (18,14 m.) un engin de dimensions correspondantes aurait été d'une construction difficile, d'un maniement délicat et d'un coût excessif eu égard à l'importance du déblai à effectuer.

Les procédés de boisage employés furent nombreux et variés; la comparaison en serait fort intéressante, surtout en ce qui concerne la construction des stations dont la voûte était large et peu haute; mais ce serait sortir du cadre de cette étude uniquement consacrée au bouclier: nous ne nous y arrêterons pas.

II. — DES BOUCLIERS

Généralités. — Onze boucliers furent mis en service; quatre d'entre eux sortaient de la maison Champigneul; les sept autres avaient été construits pour la partie métallique par MM. Beaudet et Donon, pour la partie mécanique par M. Moranne jeune.

Les quatre premiers engins étaient d'un même type, à part quelques modifications de détail que nous mettrons en évidence dans l'étude de chacun d'eux.

Les sept autres quoique fournis par la même maison différaient

essentiellement les uns des autres ; poursuivant la réalisation d'idées personnelles, chaque entrepreneur s'était en effet ingénié à modifier les formes et les dimensions de son armature, soit qu'il eût l'espoir d'une réussite plus complète, soit simplement qu'il voulût construire un engin ne ressemblant pas à celui du voisin.

Répartition des boucliers dans les différents lots. — Le nombre des boucliers se trouva être égal à celui des lots sans que pour cela chaque entrepreneur ait eu le sien.

Voici quelle était, sur les chantiers, la répartition et le genre des engins :

1er lot. — Exécuté en régie. Deux boucliers Champigneul.

2e lot. — Un bouclier, système Charrieux, dit type Dioudonnat du nom de l'entrepreneur ; bouclier fourni par la maison Moranne.

3e lot. — Deux boucliers identiques au précédent.

4e lot. — Deux boucliers dits type Wéber du nom de l'entrepreneur (Moranne jeune, constructeur).

6e et 7e lots. — Par lot, un bouclier dit type Lamarre, du nom de l'entrepreneur.

8e et 11e lots. — Par lot, un bouclier Champigneul.

Les entrepreneurs des autres lots, à savoir : les 5e, 9e et 10e firent usage des anciennes méthodes de boisage.

Ordre de cette étude. — Nous ne voulons ici que décrire les différents engins, exposer les difficultés rencontrées et tirer des faits l'enseignement qu'ils comportent ; nous pourrions suivre l'ordre naturel des lots : il sera plus logique de rapprocher les uns des autres les boucliers semblables, nous éviterons ainsi les répétitions inutiles et la comparaison des types sera plus aisée. A part d'ailleurs les quatre boucliers Champigneul qui furent employés dans le 1er, le 8e et le 11e lot, c'est-à-dire aux deux extrémités du tracé, les autres se présentent dans l'ordre même de numération des lots et peuvent être ainsi étudiés.

I. — BOUCLIERS CHAMPIGNEUL

Il y eut, nous l'avons dit, quatre boucliers semblables construits par la maison Champigneul ; deux furent utilisés par la ville dans le premier lot exécuté en régie, les deux autres fonctionnèrent dans le huitième et le onzième lot.

Nous décrirons une fois pour toutes les quatre armatures, nous exposerons ensuite l'usage qu'on en fit en insistant surtout sur les particularités spéciales à chaque chantier.

Description du bouclier. — L'armature (fig. 127 et 128) se composait essentiellement d'une tôle d'acier de 7,05 m. de longueur

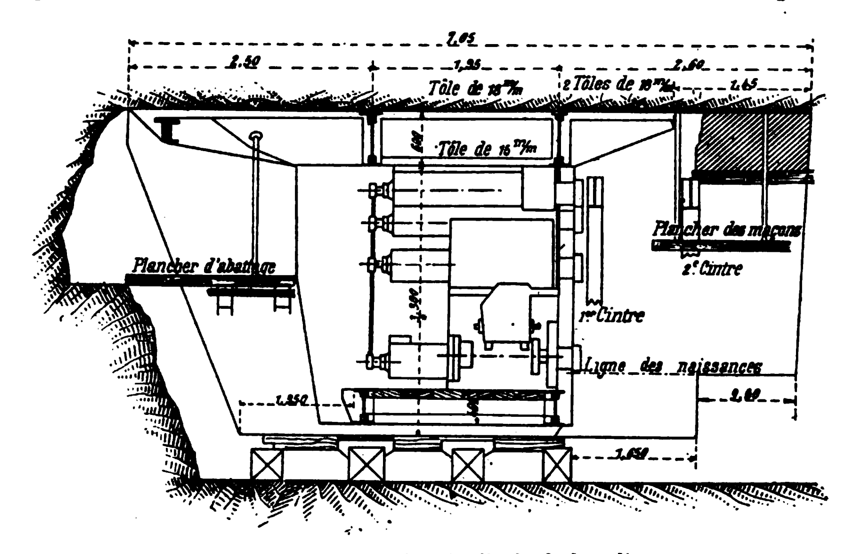


Fig. 127. — Coupe longitudinale du bouclier.

et de 18 mm. d'épaisseur, épousant exactement la forme d'extrados de la section à construire et portée par deux poutres principales.

La tôle d'enveloppe descendait jusqu'à 695 mm. au-dessous des naissances, elle était taillée en visière à l'avant sur 1,15 de longueur ; à l'arrière elle était coupée carrément mais ne descendait qu'au niveau des naissances sur 950 mm. de longueur.

Les deux poutres maîtresses elliptiques avaient 600 mm. de hauteur en clef, 802 mm. en pied ; elles étaient formées d'une âme de 20 mm. d'épaisseur et de quatre cornières de $\frac{100 \times 100}{12}$ elles étaient rivées d'une part à l'enveloppe, de l'autre à une tôle de 290 cm. de longueur et 15 mm. d'épaisseur. Une petite poutre

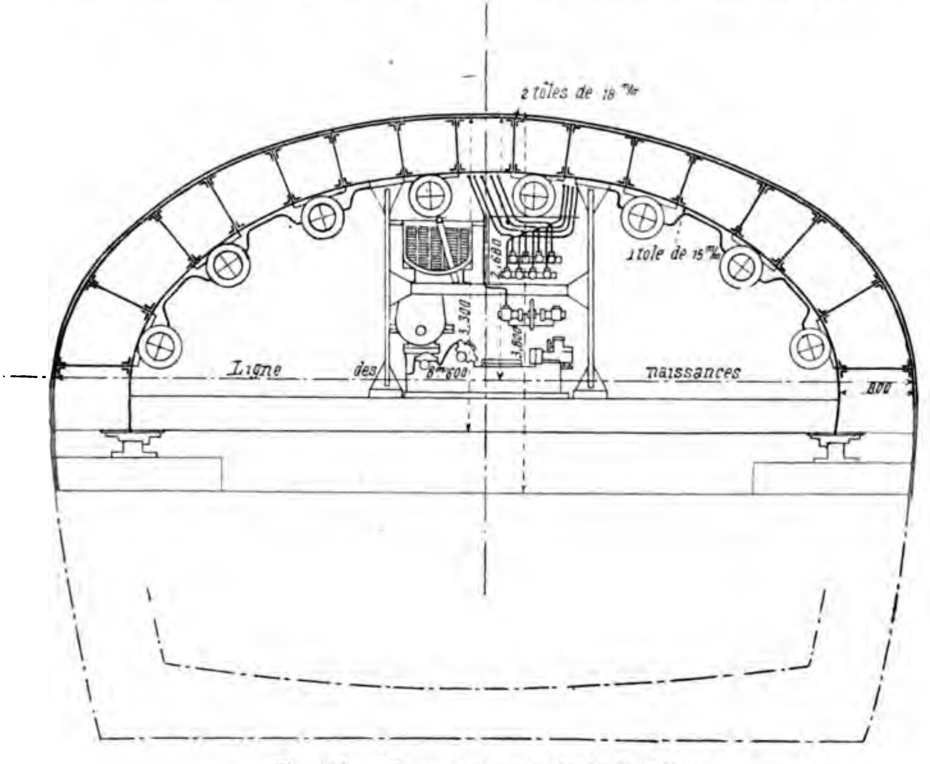


Fig. 128. — Coupe transversale du bouclier.

horizontale réunissait les deux pieds de chaque arc en faisant office de tirant ; cette poutre était formée d'une âme de 340/12 rivée à deux semelles de 260/12 par quatre cornières de $\frac{100 \times 100}{12}$.

La distance des poutres d'axe en axe était de 1,95 m.; elles partageaient ainsi l'armature en trois parties ayant pour longueurs :

Avant-bec	2,50 m.
Corps proprement dit	1,95
Queue ou arrière-bec	2,60
Total	7,05 m.

Seize entretoises longitudinales reliaient les deux poutres sur toute leur hauteur; l'avant-bec était raidi à son extrémité par des fers en U de 160 $\times$ 60 rivés sur un plat de 160 $\times$ 15; à son pied il était supporté par 16 consoles de 1,60 m. de longueur; l'arrière-bec soutenu au talon par des consoles de 1,150 m. de longueur restait en porte à faux sur 1,450 m., il était d'ailleurs doublé sur toute sa longueur par une tôle d'acier de 18 mm.

Un plancher horizontal recouvert de madriers était construit sur l'ossature métallique formée des deux poutrelles d'entretoisement des arcs et de neuf longerons longitudinaux (une âme de 260 $\times$ 10, 4 cornières de $\frac{80 \times 80}{9}$).

Les dimensions extérieures extrêmes de l'armature étaient

Longueur	7,050 m.
Largeur	8,732
Hauteur	3,381

Machinerie, planchers. — Le plancher supportait en son milieu la machinerie : dynamo motrice, pompes, robinetterie; de part et d'autre de cette portion centrale de 2,14 m. de largeur, deux passages latéraux restaient libres sur 2,48 m. de largeur et 2 m. de hauteur maxima.

Dans l'avant-bec un plancher suspendu partageait la chambre de travail en deux parties ; la hauteur libre sous le plancher était de 2 m. environ ; au-dessus elle n'était guère que de 1,80 m. à la clef.

Entre la tôle d'avant-bec et des cornières disposées *ad hoc* on pouvait faire glisser des palplanches mobiles de façon à abriter les mineurs dans les terrains ébouleux.

Vérins. — Les vérins, au nombre de huit, étaient régulièrement espacés sur le périmètre intérieur du corps du bouclier; ils étaient fixés au-dessous des caissons formés par les poutres principales, les deux enveloppes et les entretoises.

Comme dans le deuxième bouclier employé au prolongement de la ligne d'Orléans, le vérin de rappel était placé dans l'axe du piston plongeur pour éviter tout coincement au retour.

Le diamètre de ce piston était de 240 mm. soit une surface de

450 cm. ; en marche normale la pression nécessaire pour l'avancement était de 60 à 80 kg. par centimètre carré, soit un effort total de 220 à 275 t. en chiffres ronds.

Les pompes à trois corps actionnées par un arbre à trois coudes à 120° pouvaient développer 250 kg. par centimètre carré, soit 110 t. par vérin, 880 t. pour l'ensemble.

En réalité il y eut quelques courses à 40 kg. par centimètre carré, correspondant à 144 t. pour les huit presses et on ne dépassa jamais, dans les cas les plus difficiles, l'effort total de 500 t.

La surface frottante de l'engin était de 70 m² ; par centimètre carré de cette surface l'effort réalisé était donc :

En moyenne.	0,31 kg.
Dans les cas extrêmes	0,65
Et on pouvait atteindre	1,20

La course des vérins était de un mètre ; elle s'effectuait en seize minutes. La dynamo motrice avait une force de douze chevaux, elle fonctionnait sous une tension de 220 volts.

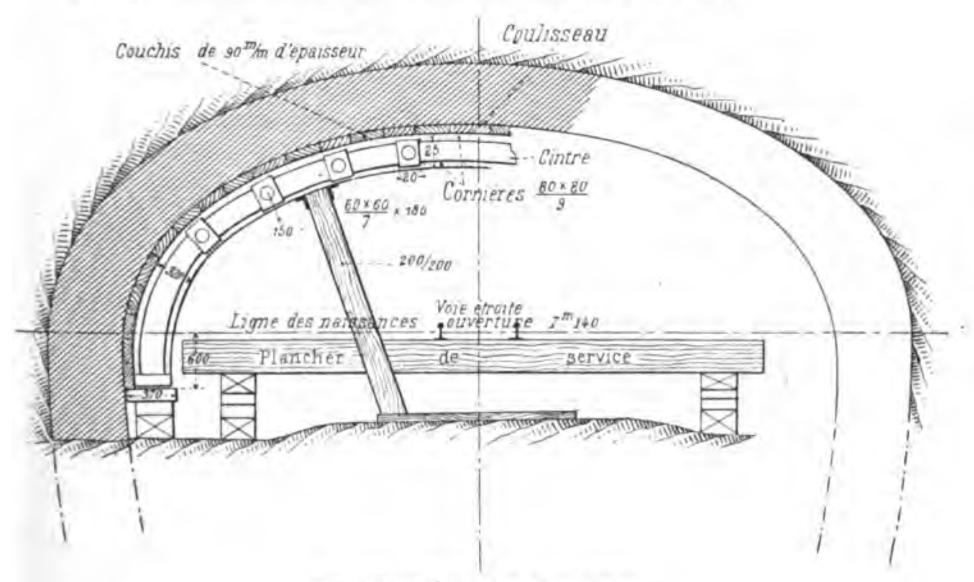


Fig. 129. — Élévation d'un cintre.

Cintres et entretoises. — Les cintres (fig. 129) étaient en fer, au nombre de trente, espacés de mètre en mètre ; chacun était cons-

titué par une âme et quatre cornières, à la clef l'âme avait 320 mm. de hauteur, 7 mm. d'épaisseur, les cornières avaient $\frac{80 \times 80}{9}$ et étaient fixées par des rivets de 18 mm.; aux naissances l'âme n'avait que 305 mm. de largeur. Chaque cintre était formé de deux parties qu'on assemblait par des cornières de $\frac{100 \times 100}{12}$ et des fourrures; on réglait isolément chaque demi-cintre avant l'assemblage au moyen de coins reposant sur des madriers.

On faisait supporter une partie du poids de la maçonnerie à deux butons en sapin de 200/200 mm. d'équarrissage qu'on engageait dans deux logements ménagés sous le cintre symétriquement par rapport à l'axe; chaque logement était formé d'une semelle de 360 mm. $\times$ 180 mm. et de deux cornières de $\frac{60 \times 60}{7}$.

Au droit de chaque presse un renfort de 230$\times$7 mm. était fixé sur des fourrures de 9 mm.; au centre du renfort on boulonnait des butées en fonte sur lesquelles prenaient appui des entretoises; l'ensemble des 240 entretoises (huit par cintre) et des 480 butées assurait aux cintres une solidarité parfaite.

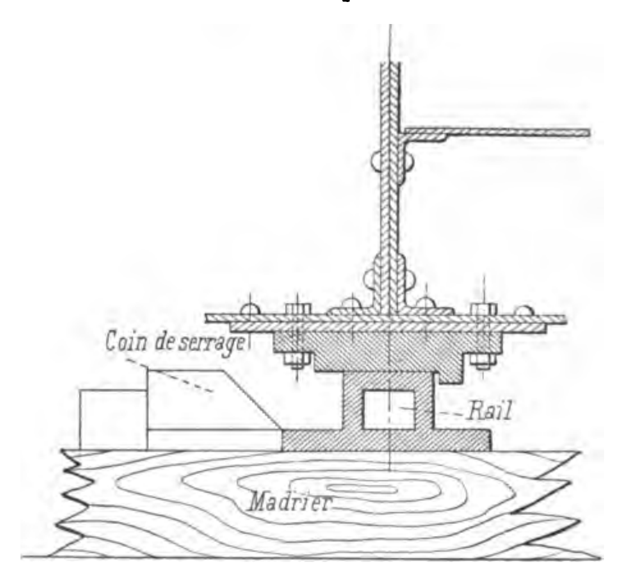


Fig. 130. — Détails de l'appui du bouclier sur le sol.

Appui du bouclier. — Le bouclier reposait sur le sol par l'intermédiaire de deux rails creux métalliques (fig. 130) sur lesquels

il glissait; entre l'engin et le rail, dont l'axe était à 802 mm. de l'extrados, c'est-à-dire sous l'attache du plancher de contreventement, on interposait une semelle à talon intérieur destinée à assurer le réglage en plan.

Le support du rail était formé par des madriers placés bout à bout et s'assemblant à mi-bois; à chaque course pour préparer le chemin, il fallait en moyenne quarante-cinq minutes, soit quatre heures par jour (quatre courses) avec les pertes de temps inévitables.

PREMIER LOT

DE LA PORTE DE VINCENNES A LA STATION DE LA RUE DE REUILLY EXCLUSIVEMENT

Tracé en plan et profil en long. — Le premier lot a une longueur totale de 1789,83 m. Le tracé en plan (fig. 132) présente successivement, de la station de la porte de Vincennes à celle de la

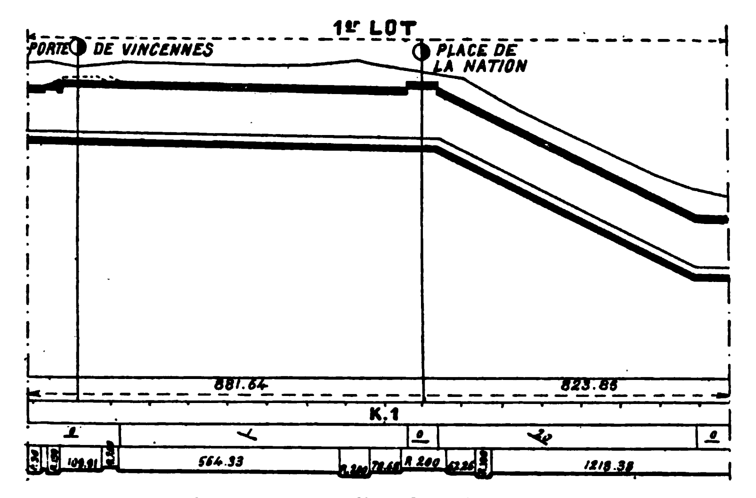


Fig. 131. — Profil en long du 1er lot.

rue de Reuilly, une courbe de 200 m. de rayon et 39,10 m. de longueur; un alignement droit de 564,33 m., une courbe de 200 m. de rayon et de 79,68 m. de développement, un alignement droit de 78,68 m., deux courbes de 200 et 100 m. de rayon,

117,318 m. et 49,26 m. de longueur, séparées par un alignement droit de 62,66 m. et le reste en alignement droit.

Le profil en long (fig. 131) commence par un palièr de 231,29m. de longueur; puis viennent une pente de 1 mm. sur 736,69 m., un palier de 75 m. correspondant à la station de la place de la Nation, une pente de 20 mm. sur 661,50 m., et un palier qui se prolonge jusqu'à l'extrémité de la station de la rue de Reuilly.

A la porte de Vincennes, la gare terminus est disposée en raquette; nous ne parlerons pas de cette partie à section étroite, exécutée par les procédés courants de boisage.

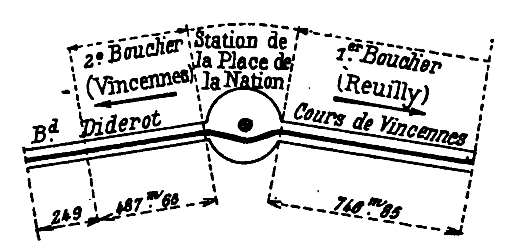


Fig. 132. — Plan du 1er lot (division en chantiers).

Montage et essai des engins. — Les deux boucliers du premier lot partirent de la place de la Nation, chacun d'eux fut monté exactement au niveau et à l'origine du souterrain qu'il devait creuser. On ouvrit une fouille blindée de 8,950 m. de largeur sur 8,850 m. de longueur (ces dimensions ne comprennent pas l'épaisseur des boisages). A l'aide d'un pont-grue jeté sur cette baie on descendit les trois parties qui, montées et clavées, constituèrent l'armature.

Le premier des deux appareils devait marcher dans la direction de la rue de Reuilly ; il ne fut livré que le 12 février 1899 avec trente-huit jours de retard sur les délais prescrits ; le deuxième devait se diriger sur la porte de Vincennes, il ne fut achevé que le 15 mai avec quatre-vingt-dix-sept jours de retard.

L'entrepreneur subit de ce fait, à raison de 100 fr. par jour, une retenue de 13 500 fr. sur le prix de son marché.

Les essais, aux termes des conventions, devaient durer huit jours; l'entrepreneur restait d'ailleurs responsable des vices de construction pendant l'entière durée des travaux.

Fonctionnement du premier bouclier (sur Reuilly). — Il est nécessaire que nous exposions successivement le mode de fonctionnement des deux boucliers, puisqu'on mit en œuvre dans leur conduite deux méthodes très différentes.

La surface de la section entière du souterrain est de 50 m²; or, le foisonnement des terrains rencontrés était de 40 p. 100 en moyenne ; il fallait donc extraire 70 m³ de déblai par mètre

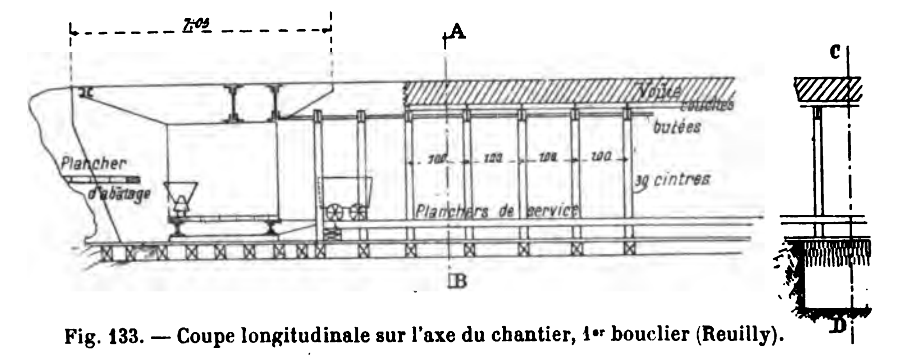


Fig. 133. — Coupe longitudinale sur l'axe du chantier, 1er bouclier (Reuilly).

courant; sur ce total, on enlevait sous l'enveloppe métallique 37 m³ correspondant à la surface de 26 m² occupée par l'engin.

Le déblaiement et la construction du revêtement maçonné

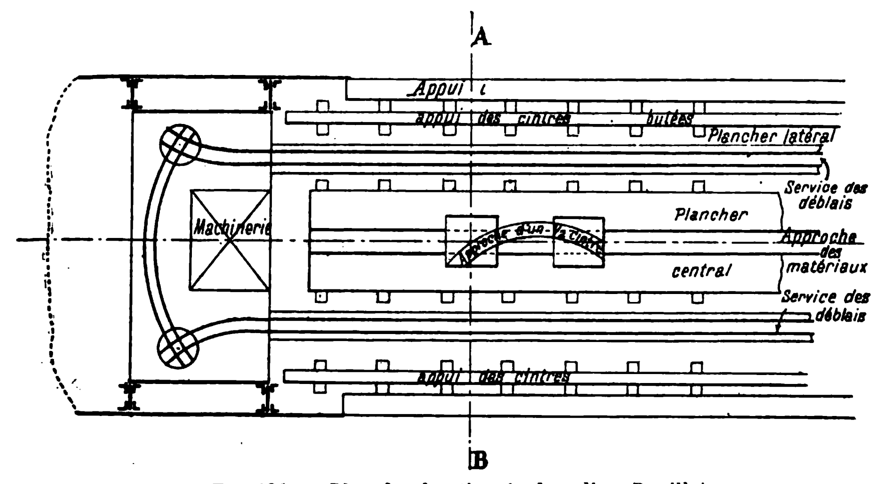
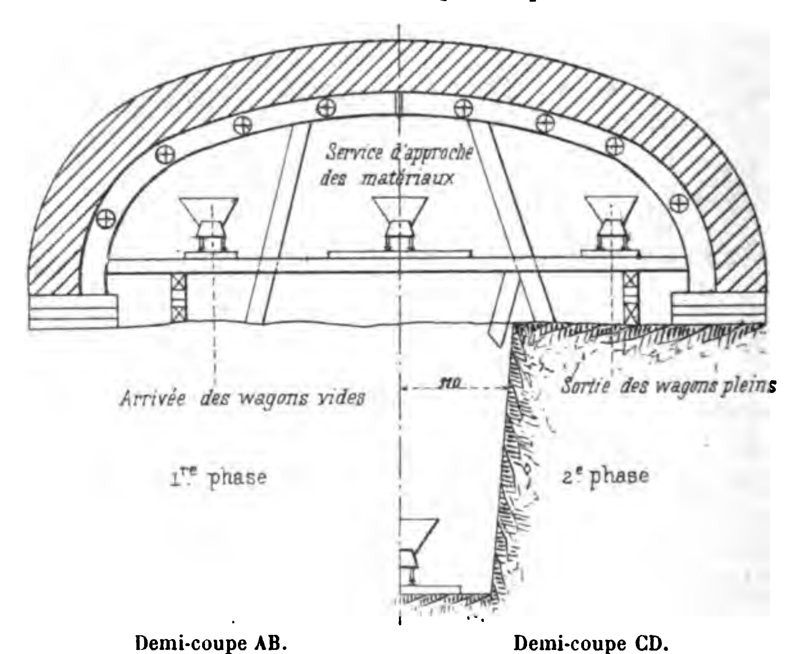


Fig. 134. — Plan du chantier, 1er bouclier (Reuilly).

s'effectuaient progressivement. Pour le premier bouclier l'opération se décomposait en quatre phases distinctes.

Première phase. — Les terrassiers logés aux deux étages de la chambre de travail procédaient à l'abatage sous l'avant-bec. Le plancher du bouclier portait une voie transversale reliée par deux plaques tournantes à deux voies latérales, établies sur un plancher de service sur toute la longueur du chantier (fig. 133 et 134). Les wagons vides arrivaient par exemple à droite de la caisse renfermant la machinerie, étaient placés parallèlement au front



Demi-coupe AB. Demi-coupe CD.

Fig. 135. — Premier bouclier (Reuilly).

de taille, recevaient leur chargement et repartaient sur la voie de gauche; il n'y avait ainsi aucune interruption dans le service d'approche des wagons vides ou d'enlèvement des wagons pleins (fig. 135).

On amenait à pied d'œuvre les matériaux de construction par une voie centrale passant entre les butons qui supportaient les cintres.

Deuxième phase. — A hauteur des derniers cintres d'arrière, on ouvrait une cunette centrale de 2,20 m. de largeur; les wagons circulant sur une voie posée dans cette cunette recevaient

les déblais arrivant par les voies latérales; l'échange s'effectuait par déversement au moyen de trémies.

Troisième phase. — On procédait à l'abatage latéral du grand

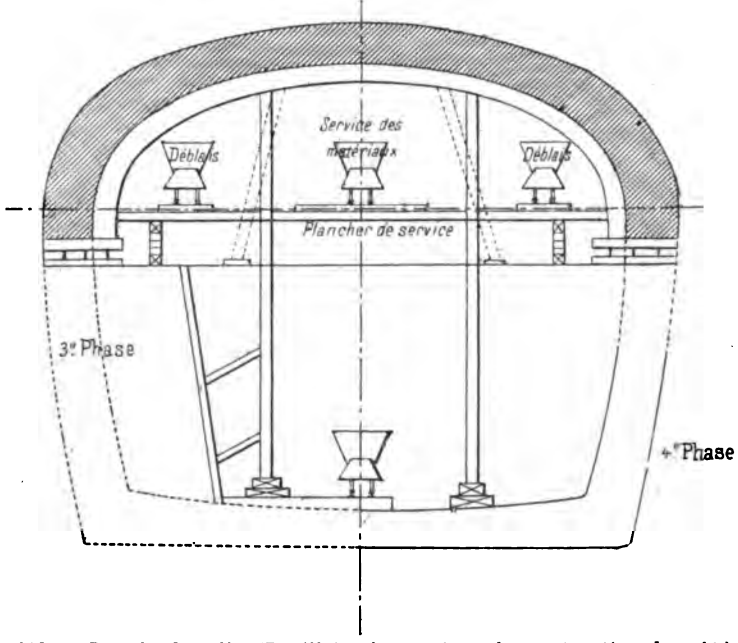


Fig. 136. — Premier bouclier (Reuilly). Abatage latéral, construction des piédroits.

stross, suivant un talus assez raide qu'il fallait parfois soutenir (fig. 136).

Quatrième phase. — On effectuait la reprise en sous-œuvre des piédroits et la construction du radier, par anneaux de 2 m. de

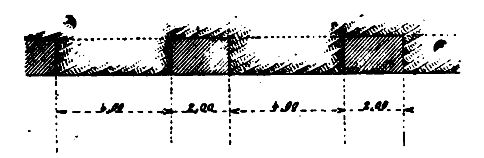


Fig. 137. — Construction des piédroits et du radier.

largeur; entre deux anneaux successifs on laissait un intervalle de 4 m (fig. 137).

Quand la voûte était ainsi soutenue, on construisait les anneaux intermédiaires.

Là où le revêtement maçonné était achevé, il n'y avait plus que la voie inférieure centrale avec garages (fig. 138); les planchers de support des voies supérieures étaient démontés à mesure et reportés en avant. Cette manœuvre utilisait continuellement

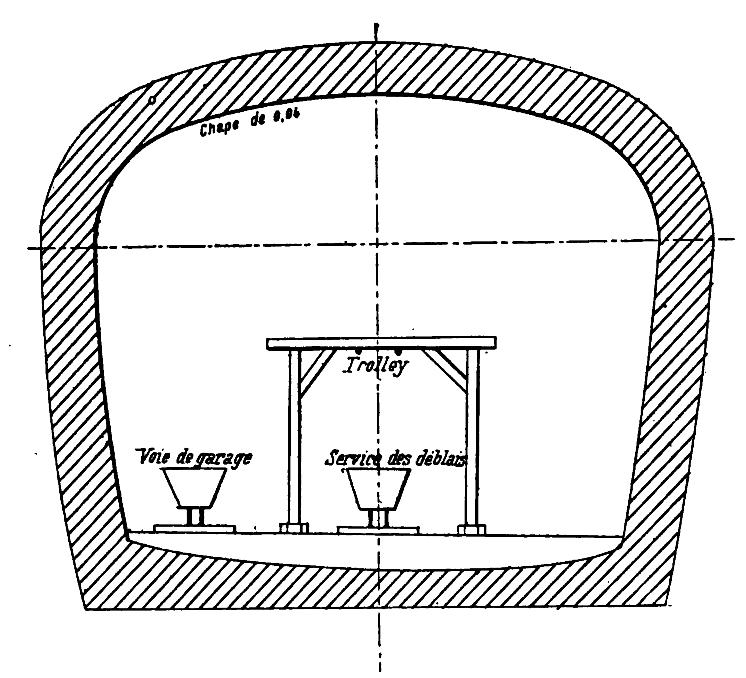


Fig. 138. — Premier bouclier (Reuilly). Coupe transversale sur la partie achevée.

6 hommes et coûtait très cher : c'était un des gros inconvénients la méthode.

L'élévation des matériaux du fond de la fouille à hauteur du plancher de service devait se faire avec une grue électrique ; en réalité cette grue ne fut jamais montée, et les moellons, le sable et le mortier étaient élevés à la main ; il faut remarquer, d'ailleurs, qu'on n'avait pas à manutentionner les cintres d'un poids considérable : on les démontait sur le plancher même au niveau de leur emploi.

Quand l'abatage était suffisant à l'avant, on montait le dernier cintre, on posait les entretoises, on vérifiait le chemin de glissement et on mettait la pression sur les vérins, pour effectuer une course, soit 1 m.

A l'arrière, à l'abri de la queue de l'armature, les maçons construisaient la calotte sur une longueur de 2 m., correspondant à trois cintres; on procédait à ce travail par échelons : un premier

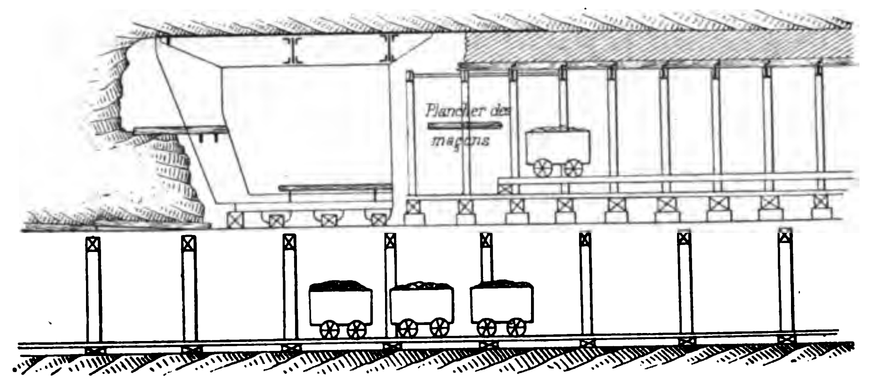


Fig. 139. — Deuxième bouclier (Vincennes). Coupe longitudinale du chantier.

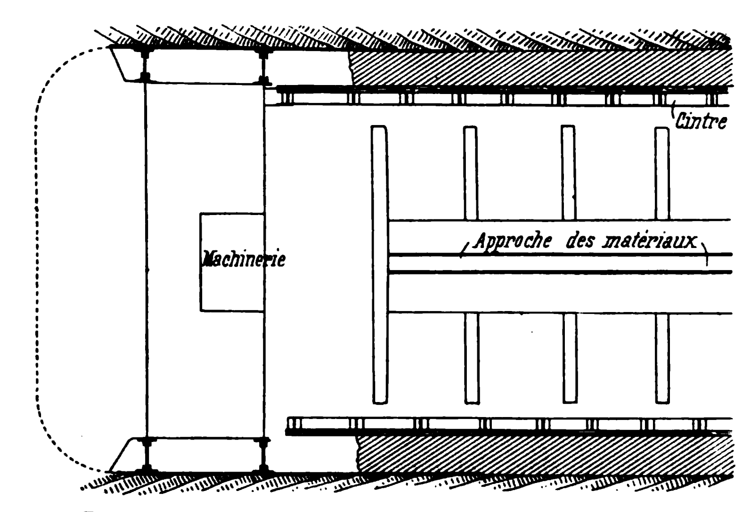


Fig. 140. — Deuxième bouclier (Vincennes). Plan du chantier.

atelier amorçait les piédroits, un second construisait les retombées, un troisième clavait.

Le plancher des maçons était suspendu à la voûte, il fallait le démonter à chaque course pour qu'on pût placer le cintre : ceci encore était mauvais.

Fonctionnement du deuxième bouclier (sur Vincennes). — On procédait d'une façon tout autre avec le deuxième bouclier.

Une galerie blindée précédait l'engin de 80 m. environ (fig. 139); elle servait à reconnaître la nature des terrains traversés, à diriger le percement; surtout elle permettait l'enlèvement rapide des déblais.

On découvrait le plafond de la galerie, sous l'avant-bec de

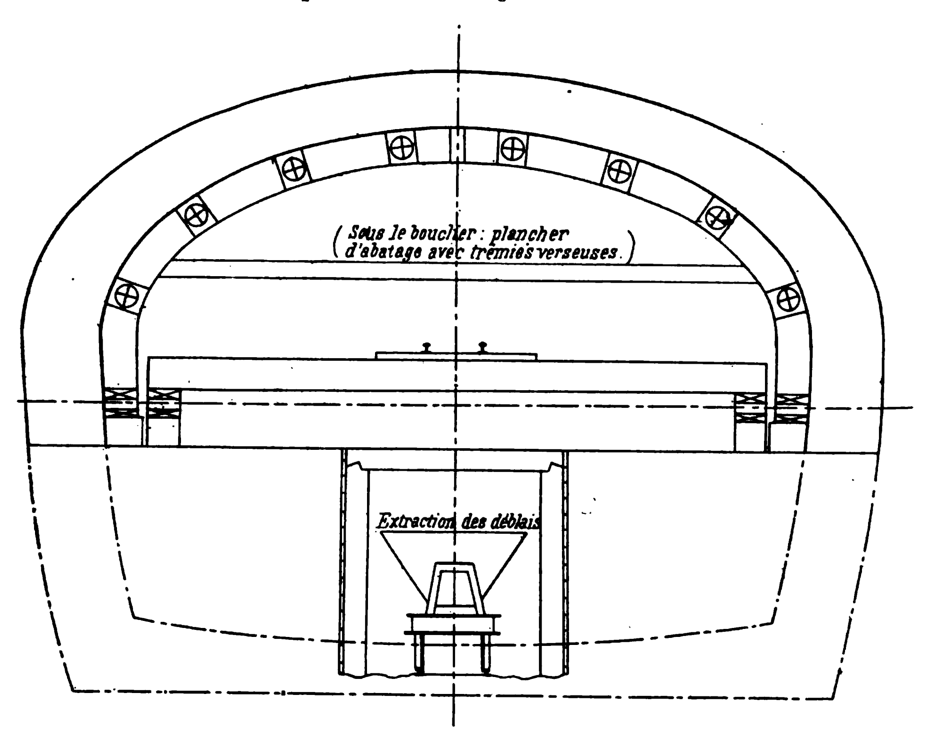


Fig. 141. — Deuxième bouclier (Vincennes). Coupe transversale sous les cintres.

l'engin, et les ouvriers jetaient directement les terres dans les wagons disposés en rame au fond de la cunette; dès qu'une rame était pleine, on la remplaçait par une vide.

L'approche des matériaux (fig. 140) se faisait par un plancher reposant sur les parois de la cunette. Il n'y avait plus de voies latérales; pour mieux dégager la section on avait même supprimé les butons de supports des cintres (fig. 141); ces derniers, suffisamment résistants par eux-mêmes, ne fléchissaient pas d'une façon sensible sous le poids de la voûte.

Comme dans le précédent chantier, il n'y avait pas d'élévateur

électrique. Quant à la manœuvre, elle s'effectuait comme pour le premier bouclier (Reuilly).

Composition des équipes. — Sur le premier chantier (Reuilly) on employait en moyenne :

Treize terrassiers ou mineurs travaillant à l'abatage sous le bouclier.

Six manœuvres pour le roulement des wagonnets sous l'enveloppe.

Trois terrassiers pour l'abatage de la cunette centrale d'arrière.

Sur le deuxième chantier (Vincennes), le chargement des terres étant plus rapide, il n'y avait que dix mineurs sous l'avant-bec et pas de manœuvres pour l'approche des wagons. En revanche l'exécution de la galerie d'approche employait cinq ouvriers, deux mineurs à l'abatage et trois terrassiers au chargement, poussant les wagons jusqu'au point où la machine les prenait.

Sur les deux chantiers on comptait :

Six manœuvres, pour conduire les déblais de l'arrière du bouclier à la machine.

Cinq maçons, quatre terminaient la calotte, un amorçait l'anneau suivant dès qu'on avait placé le cintre. Ces cinq maçons suffisaient et au delà ; ils avaient presque toujours fini deux heures avant la nouvelle course.

Six bons mineurs pour la pose et le réglage des cintres.

Douze terrassiers pour l'abatage du grand stross.

Quatre maçons pour l'exécution des piédroits et du radier par anneaux de deux mètres.

Six manœuvres employés aux injections dont nous parlerons plus loin.

Il faut ajouter à ces nombres deux manœuvres par maçon, et doubler les équipes, le travail étant continu par vingt-quatre heures.

En totalisant les unités de tous les services généraux et spéciaux on arrive à 900 hommes pour l'ensemble du lot.

Vitesse. — Le premier bouclier (Reuilly) fut mis en marche le 7 mars 1899 et arrêté le 16 octobre 1899 ; pendant ces 224

jours il parcourut 710,12 m. ; la durée totale du fonctionnement se décompose ainsi :

19 jours	pendant	lesquels	on n'a pas fait de course.		
7	—	—	—	on a fait 1 course.	
22	—	—	—	—	2 courses.
47	—	—	—	—	3 —
129	—	—	—	—	4 —

Si l'on déduit les dix-neuf jours de repos et cinq jours de vingt-quatre heures correspondant à dix jours pendant lesquels on n'a travaillé que la nuit, il reste deux cents jours de travail effectif, ce qui donne une vitesse quotidienne de 3,55 m.

Le second bouclier (Vincennes) fut livré avec un retard sensible, en attendant, le travail fut commencé sur bois à l'autre, extrémité si bien que l'armature n'eut à parcourir que 464,25 m. au lieu de 736 m. Elle le fit en 130 jours, du 28 mai 1899 au 4 octobre 1899 ; cette période comprend :

7 jours de repos.					
4	—	pendant lesquels	on n'a fait qu'une course.		
7	—	—	—	on a fait 2 courses.	
9	—	—	—	—	3 —
103	—	—	—	—	4 —

En retranchant de ce total les sept jours de repos et trois jours correspondant à sept journées pendant lesquelles on n'a travaillé que la nuit il reste cent vingt jours de travail effectif, soit une vitesse moyenne de 3,87 m. par jour.

Ces chiffres montrent combien l'avancement était régulier ; jusqu'au 9 mai le bouclier Reuilly ne faisait que trois courses par vingt-quatre heures, mais après cette date on effectua quatre courses ; quant au bouclier Vincennes il fournit presque toujours quatre courses. On aurait pu progresser quotidiennement de 5 m., mais les ouvriers assurés d'un gain proportionnel à la durée des travaux se refusèrent à réaliser cette augmentation de vitesse.

Les seules causes d'arrêt furent les lendemains de paye, les jours de fête, une période d'inondation dans le souterrain Reuilly et quelques menus incidents.

Une diagramme de marche serait sans intérêt, nous nous bor-

nerons à citer comme exemple la journée du 11 juin prise au hasard; ce matin là à six heures il y avait deux cent cinquante-cinq cintres posés, les courses eurent lieu de 12 h. 15 à 12 h. 45, de 5 h. 15 à 5 h. 45 (du soir), de 1 h. 30 à 1 h. 45 (du matin) de 6 h. à 6 h. 20 (du matin).

On remarquera que la durée effective d'une course était en moyenne de vingt-cinq minutes, alors qu'à blanc cette durée n'était que de seize minutes : la différence provient du soin qu'on apportait au bourrage suivant un procédé dont nous parlerons tout à l'heure.

Sur le deuxième chantier (Vincennes) la galerie de reconnaissance avançait de 3,40 m. par jour; cet atelier fonctionnait à raison de deux équipes de onze heures par jour complet; chaque poste posait son cadre, c'est-à-dire procédait à 1,40 m. d'abatage ; avec trois postes de huit heures on serait arrivé sans difficulté à progresser de 4,20 m. par jour, c'est-à-dire un peu plus vite que le bouclier; mais par suite des 80 m. d'avance que la galerie avait au départ de l'engin on n'éprouva pas le besoin de s'imposer cette vitesse.

Terrains rencontrés. — Il n'y a pas eu de difficultés dans le percement ; les terrains rencontrés étaient des remblais, du sable tendre, de la caillasse, surtout de la marne blanche : le pic a suffi sans qu'on ait recours à la mine.

Dans le premier chantier (Reuilly) on a rencontré un peu d'eau provenant d'une nappe à hauteur du radier sur une couche d'argile. On n'a jamais utilisé le ciel mobile disposé sous l'avant-bec; quand le terrain était trop ébouleux les ouvriers se protégeaient directement au moyen de planches engagées et appuyées sur l'enveloppe.

Bourrage et injections. — Entre la maçonnerie et la tôle on laissait en moyenne 7 à 8 centimètres de vide; pendant la course suivante on bourrait soigneusement cet intervalle avec du mortier ordinaire. Mais très souvent, à mesure qu'avançait le bouclier, le terrain disloqué s'affaissait sur l'extrados de la calotte et le bourrage devenait impossible ; l'ébranlement des

terres transmis jusqu'à la chaussée la bouleversait. On chercha à prévenir les tassements futurs par des injections de mortier de ciment sous pression. Les résultats furent médiocres, le liquide se creusait des poches où il s'accumulait sans profit pour la résistance : en certains points on trouva des gites où 1 m³ de ciment s'était déposé.

Incidents. Modifications. — Ce mouvement des terres fut très préjudiciable aux chaussées : en général il y avait de 1,80 m. à 2,25 m. entre l'enveloppe du bouclier et la voie publique, pour peu que le terrain s'affaissât et glissât le long de l'armature, il se produisait des flâches importantes ; les tassements de 80 cm. ne furent pas rares, si bien que la circulation n'était réellement possible que sur les côtés de la voie et non sur l'axe de l'engin : plusieurs rails des lignes de tramways cassèrent.

La direction en plan et en profil fut grandement facilitée par des sondages qui, pratiqués dans le boulevard, permettaient un repérage exact.

Le seul incident à noter fut le déversement du deuxième bouclier de 30 cm. sur la gauche du tracé, on le ramena graduellement à sa position normale par la pose convenable de son chemin de glissement. et l'effort combiné des vérins.

En mai 1899 on coupa les tôles de la queue du premier bouclier à 0,70 m. au-dessus du niveau des naissances. Ceci permit de bloquer énergiquement la maçonnerie contre le sol, à partir de ce moment le terrain se déplaça moins et on ne remarqua plus l'existence de petites fissures de la voûte à la clef, fissures dues au manque de charge sur les reins.

Le deuxième bouclier fut naturellement mis en marche avec sa queue ainsi modifiée puisqu'il ne fut monté qu'en mai.

Installations mécaniques. Services généraux. — Nous avons dit que le déblai était en moyenne de 70 m³ au mètre courant foisonnement compris, le constructeur de l'engin avait tablé sur un avancement moyen de 4,50 m. par jour, ce qui conduisait à extraire 320 m³ en vingt heures de travail, soit 16 m³ à l'heure.

Les moyens d'évacuation étaient calculés en conséquence.

Les trains comprenaient huit wagons, cinq pleins, chargés de terres, trois vides ayant servi à l'approche des matériaux ; soixante voyages par vingt heures étaient nécessaires soit trois par heure.

La traction à l'intérieur du souterrain était électrique.

Sur le deuxième chantier (Vincennes) le tracteur à deux essieux pesait 2 t., il pouvait marcher à 8 km. à l'heure ; la dynamo motrice du sytème Hillairet-Huguet consommait 50 ampères sous une tension de 220 volts, soit une puissance de 11 kilowatts, la puissance effective était de 600 kilogrammètres ; en charge normale, en palier, l'effort de traction disponible au crochet était de 300 kgs.

Sur le premier chantier (Reuilly), le tracteur, en vue des rampes de 26 mm., pesait 6,720 t. ; il était à quatre essieux et actionné par deux dynamos Hillairet consommant 90 ampères sous 220 volts, soit 20 kilowatts de puissance.

Fig. 142. — Installation générale du chantier.

Le train remorqué pesait 14 t., on pouvait à la rigueur faire quatre voyages à l'heure et enlever dans ce temps vingt wagons pleins en en ramenant vingt vides.

Les déblais étaient conduits à deux monte-charges système Bernier établis place de la Nation (fig. 142). Chaque monte-charge

desservant un chantier se composait de deux plates-formes reliées en balance dans deux puits ; sa force était de 12 chev., en fonctionnement normal il levait 2 000 kgs. à la vitesse de 30 cm. à la seconde, le nombre des ascensions était de quarante à l'heure. Chaque dynamo motrice du système Hillairet, type dit cuirassé, consommait 50 ampères en pleine charge sous 220 volts, soit une puissance de 22 kilowatts pour les deux appareils.

A leur sortie des monte-charges les déblais étaient repris et conduits hors Paris ; l'organisation de ce transport était étrangère à celle du chantier proprement dit, nous n'en parlerons pas ; elle incombait à un entrepreneur payé à raison de 3 fr. 80 par mètre cube enlevé.

Deux ventilateurs système Farcot actionnés par deux dynamos Hillairet, type cuirassé, consommant 50 ampères sous 220 volts (soit 22 kilowatts de puissance totale) ne fonctionnèrent que très peu de temps ; l'établissement de trous de service les rendit inutiles.

L'éclairage comprenait : 400 lampes à incandescence de seize bougies et dix bougies, placés tous les 10 mètres en moyenne, montées par deux en série, sous 220 volts et consommant environ 13 kilowatts ; 12 foyers à arc montés par trois en série, consommant 10 ampères sous 220 volts, soit 9 kilowatts de puissance.

Enfin les dynamos des boucliers, du système Hillairet type cuirassé, consommaient 50 ampères sous 220 volts soit 22 kilowatts de puissance.

Secteur électrique. — L'énergie était fournie par une usine électrique installée place de la Nation et comprenant :

Un moteur à gaz Charon à deux cylindres, de 25 chev. de force, couplé sur une dynamo Hillairet à enroulement compound débitant 60 ampères sous 220 volts, soit une puissance de 132 kilowatts ; ce moteur brûlait 600 lit. de gaz par heure et par cheval ; il était primitivement destiné à fournir l'éclairage mais en réalité il ne fonctionna que comme machine de secours.

Deux moteurs à gaz Charon de 50 chev., à allumage électrique ; ils marchaient alternattivement de six heures en six heures et brûlaient 504 lit. de gaz par heure et par cheval.

Un moteur Otto à allumage incandescent de 55 chev. brûlant 520 lit.

Ces trois moteurs actionnaient trois dynamos Hillairet-Huguet à enroulement compound débitant chacune 160 ampères sous 220 volts, soit une puissance de 35,2 kilowatts.

Ces machines étaient montées en quantité sur le tableau de distribution, la transmission s'effectuait par courroies.

La préférence fut accordée aux moteurs à gaz sur les moteurs à vapeur pour des raisons qu'on peut, croyons-nous, ramener à trois, à savoir :

1° Absence complète de fumée ;

2° Conduite facile ;

3° Mise en marche immédiate.

Mais il semble que pour un travail aussi irrégulier, une telle organisation manquait d'élasticité ; quand le bouclier, le monte-charge et le tracteur s'arrêtaient simultanément, ce qui était fréquent, le moteur marchait à blanc.

En comptant le gaz à 0 fr. 15 le m³, le cheval-heure indiqué revenait à 0 fr. 08, mais le prix du cheval-heure effectif, s'élevait à 0 fr. 15.

En résumé, l'économie générale du chantier, au point de vue de la production et de la consommation d'énergie, était celle-ci :

1° A PLEINE CHARGE

Moteurs :

1 moteurs Otto	55 chev.
2 — Charon de 50 chev.	100 —
1 — —	25 —
Total	180 chev.

Dynamos :

3 dynamos Hillairet de 35,2 kw	105,6 kw.
1 dynamo Hillairet de 13,2 kw	13,2
Total.	118,8 soit 160 chev.

Consommation :

2 monte charges	22
1 tracteur de 6 tonnes	20
1 tracteur de 3 tonnes	11
2 ventilateurs	22
2 boucliers	22
Eclairage	22
Total	119 kilow.

2° EN ORDRE NORMAL DE MARCHE

Moteurs :

1 moteur Charon	50 chev.
1 moteur Otto	55
Total	105 chev.

Dynamos :

2 dynamos Hillairet de 35,2 = 70,4 kilowatts soit 96 chev.
(avec la dynamo de 13,2 kilowatts : 83,6 kilowatts)

Consommation :

Monte-charges	22 kilow.
Tracteurs	31
Eclairage	22
Total	75 kilow.

Quand on mettait les boucliers en marche, on arrêtait les monte-charges, ou plus souvent les tracteurs ; mais l'installation pouvait, on le voit, suffire à la consommation d'énergie exigée par le fonctionnement simultané de tous les engins.

La dépense par jour en ordre normal de marche s'élevait, rien que pour le gaz, à 200 fr., soit 25,00 fr. par mètre courant ; il faudrait ajouter à cette somme le salaire des mécaniciens et électriciens et l'amortissement du capital des machines.

Sur le cours de Vincennes une deuxième installation plus simple desservait le chantier de construction sur bois.

Elle comprenait :

1° Une locomobile de 25 chevaux ;

2° Une dynamo débitant 60 ampères sous une tension de 110 volts, soit une puissance de 6,6 kilowatts.

Cette énergie alimentait deux treuils Bernier de 5 chevaux chacun, et l'éclairage : 4 lampes à arc montées par 2 en série et consommant 10 ampères sous 110 volts, soit 2 kilowatts et 100 lampes à incandescence de 16 et 10 bougies montées en dérivation sous 110 volts et consommant en moyenne 5 kilowatts.

Conclusion et prix de revient. — Les deux boucliers du premier lot ont certes fonctionné sans incidents, sans à-coups ; on ne peut pas dire pourtant qu'ils aient entièrement répondu aux espérances qu'on fonda sur eux.

On comptait effectuer le percement sans arrêter ni même entraver la circulation ; or la désorganisation de la chaussée fut telle qu'il fallut renoncer à laisser les véhicules passer sur l'axe du tracé.

Encore ne parlons-nous pas de l'encombrement de la voie publique par les orifices d'approvisionnement ménagés de distance en distance dans la voûte afin d'accélérer le service et de diminuer les frais de transport ; ce second reproche n'est rien auprès du premier.

De pareilles critiques, il est vrai, visent la méthode plutôt que l'engin, nous y reviendrons en détail dans la seconde partie de cette étude. Nous bornant ici à l'appareil lui-même nous ne pouvons que faire ressortir la judicieuse proportion de ses différents éléments et l'unité de son ensemble.

Le meilleur éloge d'ailleurs qu'on en puisse faire c'est de dire qu'il est resté toujours identique à lui-même ; en huit mois de service on ne lui a pas fait subir de réparations sérieuses : les cintres eux-mêmes ne se sont pas déformés et les deux boucliers avec leur machinerie et leurs accessoires pourraient aujourd'hui servir à une nouvelle expérience.

Il est impossible quant à présent de donner les prix de revient. Il faut attendre l'achèvement complet des travaux pour pouvoir faire le compte des dépenses et répartir sur l'ensemble du lot le capital d'établissement.

Les frais qu'entraînèrent les installations générales, telles que l'éclairage des chantiers, la consommation d'énergie des monte-charges, la surveillance, le gardiennage..... portent à la fois sur les deux méthodes concurremment employées, la nouvelle par le bouclier, l'ancienne par les procédés ordinaires de boisage, il faut faire la part de chacune, ce qui ne sera pas sans grande difficulté.

HUITIÈME ET ONZIÈME LOTS

BOUCLIER DU HUITIÈME LOT

Plan et profil en long. — Le bouclier du huitième lot était identique aux deux précédents, il descendit l'avenue de la Grande-

Armée dans la direction de la place de l'Etoile à la Porte-Maillot.

Il suivit successivement, en profil (fig. 143), un palier, une pente de 11,5 mm. sur 83,67 m., un palier de 135,00 m. et une pente de 29,24 m. sur 193,20 m.; en plan il découvrit une courbe de 80 m. de rayon et 83,07 m. de longueur, un alignement droit de 124,47 m., une courbe de 200 m. de rayon et de 28,39 de

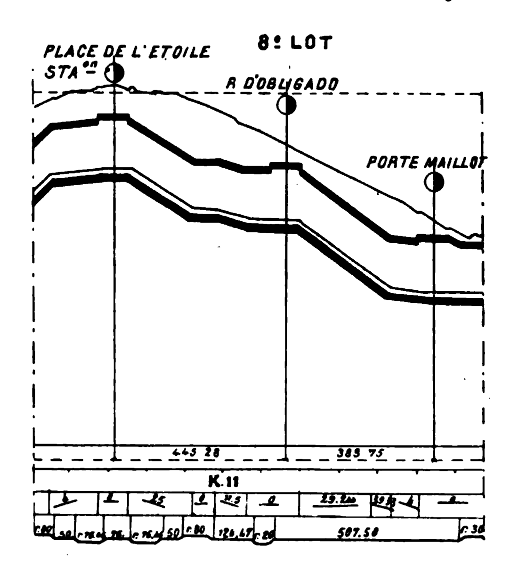


Fig. 143. — Profil en long du 8e lot.

longueur et un alignement droit se prolongeant fort au delà de l'extrémité de sa course sur 507,38 m.

Le chantier était disposé comme celui de Vincennes du premier lot; une cunette centrale précédait de 100 m. environ la marche de l'engin; c'est par elle que se faisait l'extraction des déblais directement jetés de l'avant-bec dans la rame de wagons.

On ne travaillait pas aux deux étages à la fois sous la visière de l'engin; les mineurs creusaient devant eux des niches qu'ils prolongeaient sur toute la hauteur; quand le bouclier avançait il faisait lui-même tomber les terres intermédiaires.

Le plancher des maçons au lieu d'être suspendu sous la queue, était invariablement relié au bouclier (fig. 144 et 145); il était supporté par une légère charpente reposant sur deux poutrelles engagées sous les poutres métalliques maîtresses; comme il était

entraîné dans chaque course on gagnait ainsi le temps nécessaire à la dépose et à la repose d'un plancher volant.

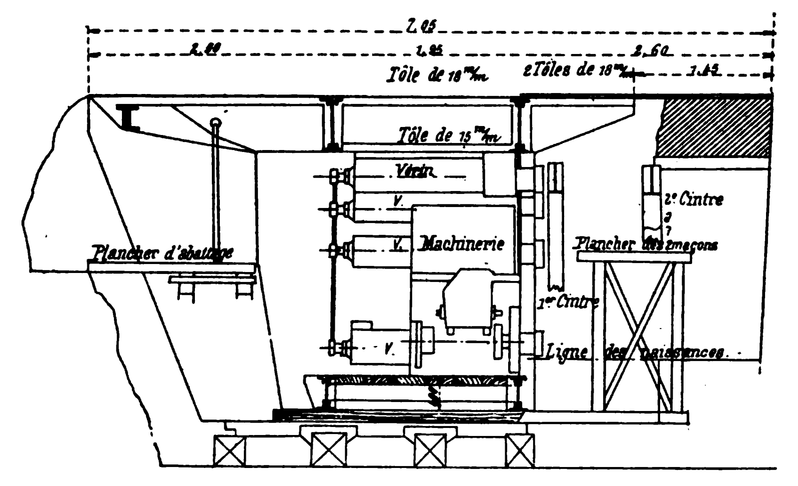


Fig. 144. — Coupe en long du bouclier montrant le plancher des maçons.

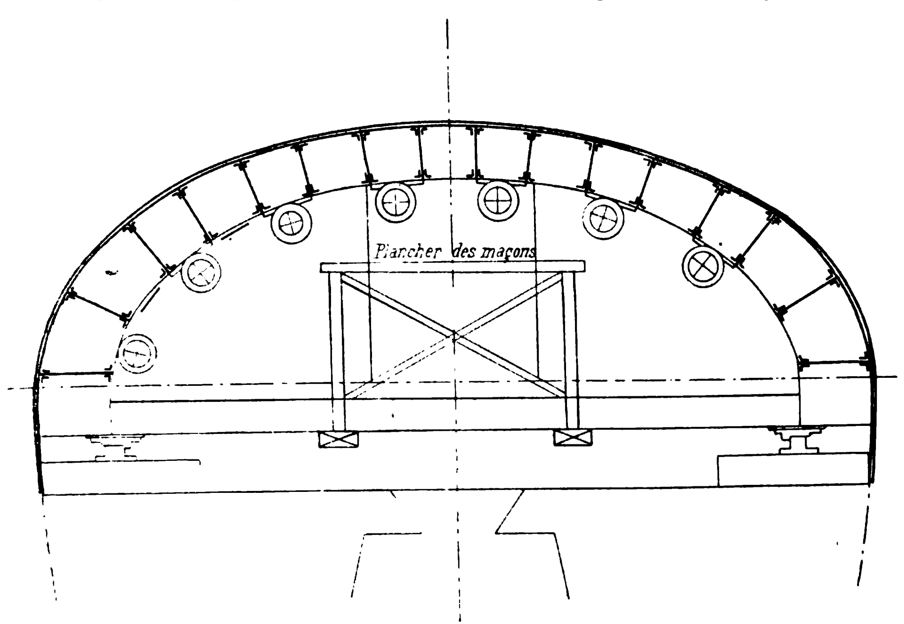


Fig. 145. — Coupe en travers du bouclier montrant le plancher des maçons,

Sur la longueur de la chambre de montage, soit 10 m., le revêtement fut établi en béton, sur le reste du parcours en meulière. Les piédroits ne furent construits que beaucoup plus tard.

Personnel, équipes. — La galerie inférieure avait 2,20 m. × 2,50 m.; l'équipe employée à son percement comprenait :

1 chef de poste, 2 mineurs, 1 terrassier ;

Il y avait 2 postes par 24 heures et chaque poste posait son cadre réalisant ainsi un avancement de 1,50 m. ; si l'on avait mis 3 équipes de 8 heures, chacune aurait parfaitement pu achever son travail dans ce temps et l'avancement journalier eût été de 4,50 m.

Sous l'armature il y avait :

1 chef de poste, 8 terrassiers, 1 mécanicien et 4 charpentiers pour la pose et le montage des cintres.

Le chantier de maçonnerie comptait :

1 chef maçon, 4 maçons et 11 garçons pour l'approche des matériaux.

Enfin 2 manœuvres étaient occupés au roulage des wagons.

Montage et essais. — Le bouclier fut monté dans l'avenue de la Grande-Armée en face du numéro 69 et au fond d'une fouille boisée de 10 m. × 10 m. ; le travail dura du 24 février 1899 au 10 mars ; le 18 mars fut effectuée la première course à blanc, le 20 mars la première course utile.

Organisation générale du chantier, installations mécaniques. — Les déblais, traînés par des chevaux dans le souterrain, étaient conduits aux monte-charges installés sur la place de l'Etoile ; ces monte-charges étaient du système Bernier et disposés en balance ; ils étaient mus par une dynamo Alioth de 10 chevaux de force branchée sur le secteur de la Rive Droite.

Une voie ferrée établie par la Compagnie des Tramways du Département de la Seine, partait de l'estacade de déversement et permettait de conduire les matériaux à Nanterre où on les employait à combler des carrières. Les locomotives affectées à ce service étaient fournies par la Compagnie des Tramways de la Seine, les wagons par l'Entreprise ; comme le dimanche la Compagnie avait besoin de ses machines pour doubler son service de voyageurs, l'Entreprise était obligée de suspendre la marche de son chantier ; d'ailleurs le nombre des wagons étant insuffisant

vu la longueur du parcours à effectuer, il fallait souvent recourir à la traction animale et employer des tombereaux.

Le sable et les cailloux amenés sur place par des automobiles à moteur de Dion et Bouton étaient primitivement descendus sur

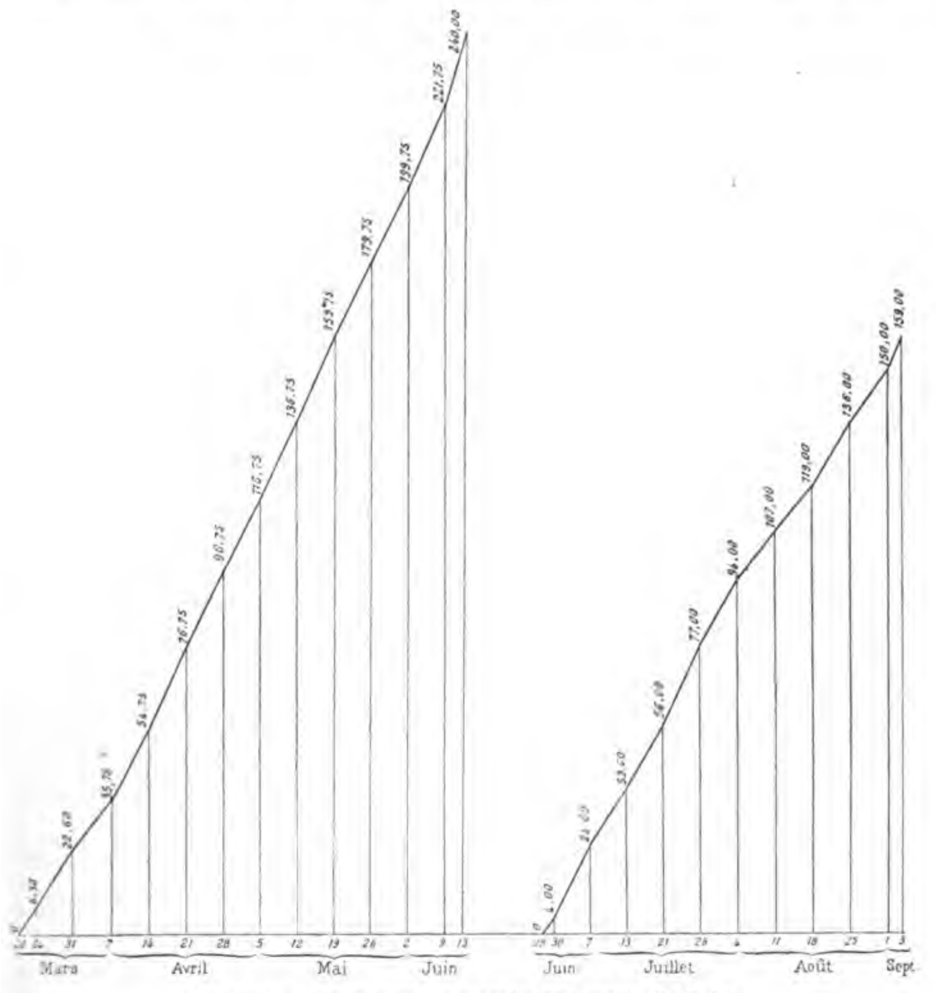


Fig. 146. — Diagramme de marche du bouclier du 8e lot.

le chantier par un trou ménagé dans la voûte qui recouvrait la chambre de montage. Plus tard, quand on eût dépassé la station d'Obligado, ils furent introduits chacun par une ouverture réservée dans le revêtement.

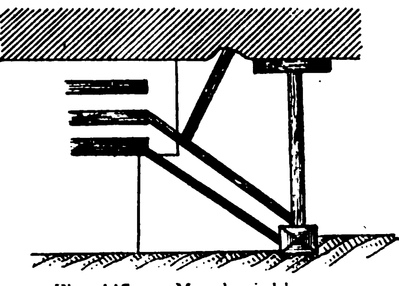
Terrains rencontrés. — On rencontra des terrains de remblais mais surtout des sables de Beauchamp agglomérés par un ciment très dur, quelques bancs de grès et de caillasse ; on n'eut jamais recours à la mine, la pioche ou le pic suffirent ; nulle part on ne trouva d'eau.

Vitesse de marche. — Le 24 mars, le bouclier avait déjà parcouru 6,30 m. ; le 31 mars 22,60 m. Son trajet total fut de 399 m. sa vitesse moyenne générale de 2,40 m. environ (fig. 146).

Son plus grand avancement hebdomadaire fut de 23 m. correspondant à 3,280 m. par jour ; son plus petit de 13 m. correspondant à 1,87 m.

La pression moyenne sur les vérins fut de 60 kg. par centimètre carré ; la pression maximum de 210 kg. ; à ces chiffres correspondent respectivement des efforts de 220 t. et 756 t. pour l'ensemble des huit vérins.

Incidents. — Le 13 juin l'armature pénétra dans la station d'Obligado ; elle la traversa par une marche à blanc de 75 m. en prenant appui sur des butons fichés contre des poutrelles serrés entre le sol et la voûte et solidement soutenues (fig. 147) ; le 28 juin elle reprenait sa marche normale, elle avait donc franchi la station avec une vitesse moyenne de 10 m. par jour.


Fig. 147. — Marche à blanc. Butée des vérins.

On avait profité de la circonstance pour couper les tôles sur les retombées afin de pouvoir bloquer les reins de la voûte contre le terrain et éviter les fissures longitudinales à la clef.

Le 4 septembre, le travail achevé, on démonta la machinerie et les poutres, il ne resta que l'enveloppe dans la maçonnerie.

La chaussée tassait en général de 25 à 30 cm. sur 4 m. de largeur ; on avait pris le parti d'interdire la circulation sur la longueur du bouclier soit 10 m. environ, de démolir le macadam à l'avant et de le refaire à l'arrière à mesure.

Conclusion. — Nous n'avons rien à ajouter à ce que nous avons déjà dit des boucliers du premier lot ; les tassements à l'arrière de l'armature furent ici plus importants et plus fréquents ; ils paraissent en partie dus à la faible surface du sol sur laquelle se répartissait la pression totale résultant du poids de l'engin et de la poussée du terrain ; il y aurait eu avantage à étendre cette surface d'appui.

BOUCLIER DU ONZIÈME LOT

Nous ne dirons rien de ce bouclier puisque par suite d'un concours de circonstances tout à fait exceptionnelles il n'a pas fonctionné.

II. — BOUCLIERS DIOUDONNAT

DEUXIÈME ET TROISIÈME LOTS

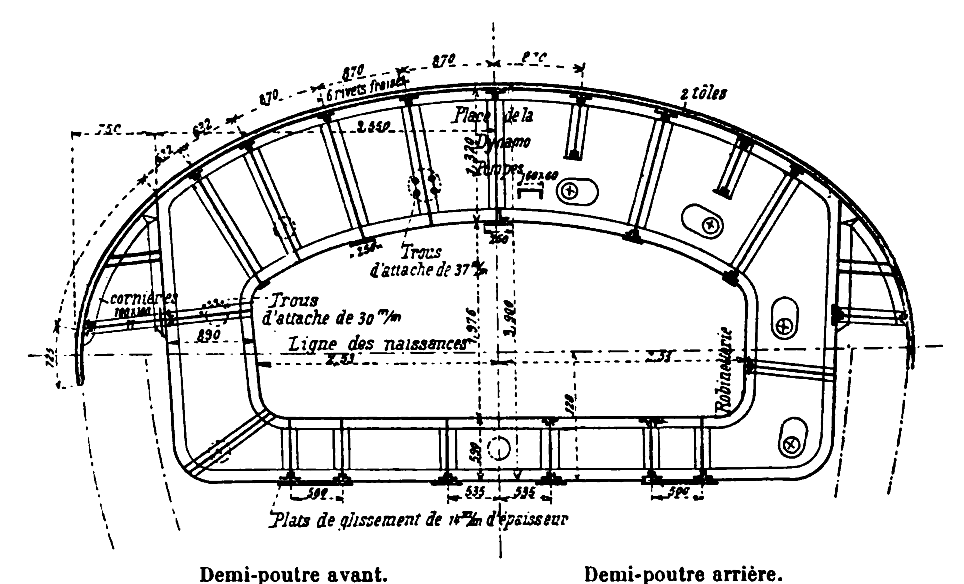
Le bouclier mis en service sous le boulevard Diderot dans le deuxième lot et les deux boucliers du troisième lot, sous la rue Saint-Antoine et sous la rue de Lyon étaient du même type, dit type Dioudonnat du nom de l'entrepreneur qui les avait commandés ; ils avaient été construits pour la partie métallique chez MM. Baudet Donon et Cie, et pour la machinerie chez M. Moraune jeune.

Nous les décrirons d'abord puis nous donnerons pour chacun d'eux le chemin parcouru, les incidents de la marche et les résultats obtenus.

Bouclier. — Le bouclier (fig. 148 et 149) était formé de deux tôles de 12 mm. d'épaisseur et 6,750 m. de longueur épousant la forme d'extrados de la voûte à construire jusqu'à 0,725 m. en dessous des naissances ; les tôles étaient taillées en visière à l'avant et à l'arrière ; elles étaient supportées par deux poutres d'une forme particulière distantes de 1,500 m. laissant au niveau des naissances une largeur libre de 5,06 m.

Chaque poutre comprenait :

1° Une traverse inférieure horizontale de 590 mm. de hauteur formée par une âme de 11 mm. d'épaisseur, fixée par quatre cornières de $\frac{90 \times 90}{9}$ en haut à une semelle de 250 mm. de largeur, en bas à une tôle reliant d'une façon continue les deux poutres.



Demi-poutre avant. Demi-poutre arrière.

Fig. 148. — Coupe transversale du bouclier, type Dioudonnat.

2° Deux montants de 890 mm. de largeur inclinés sur la verticale et constitués de la même façon ;

3° Enfin une traverse supérieure elliptique supportant directement les tôles d'enveloppe et ayant à la clef 1320 mm. de hauteur.

Ces poutres descendaient jusqu'à 1,28 m. au-dessous des naissances, mais elles n'occupaieut pas toute la largeur de la section ; entre leur semelle extérieure et la surface d'extrados du tunnel elles laissaient un espace libre suffisant pour la construction des piédroits : on pouvait exécuter ceux-ci sur 1,50 m. de hauteur dans le corps même de l'appareil ; la portion de tôle d'enveloppe laissée en porte à faux sur 75 cm. de portée était raidie par des cornières de $\frac{100 \times 100}{11}$ et soutenue par des consoles s'arrêtant au niveau des naissances.

Treize entretoises longitudinales reliaient les deux poutres sur toute leur hauteur : six d'entre elles groupées deux à deux cons-

tituaient l'ossature du plancher horizontal inférieur; les deux du centre étaient distantes de 1070 mm.; les deux extrêmes de 500 mm. quatre fers plats de 14 mm. d'épaisseur répartis sous elles servaient à la progression par glissement.

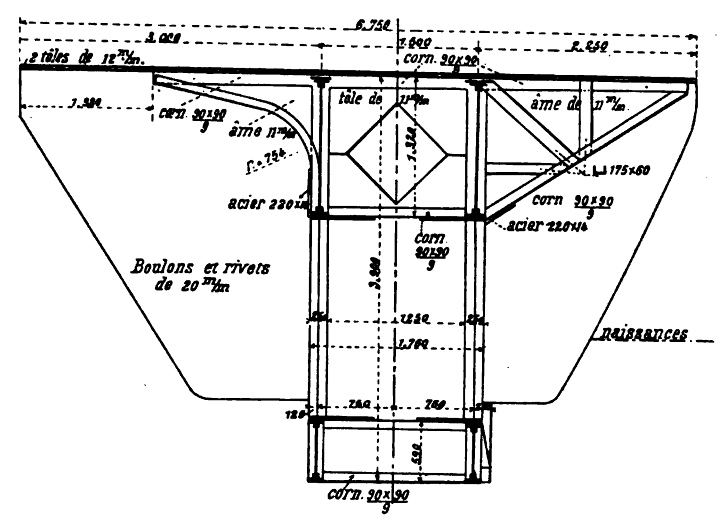


Fig. 149. — Coupe transversale du bouclier, type Dioudonnat.

Le bouclier était divisé par les poutres maîtresses en trois parties ayant respectivement pour longueurs :

Avant-bec	2,250 m.
Corps	1,500
Queue	3,00
Total	6,750 m.

La tôle d'avant-bec était soutenue sur toute sa longueur par des consoles placées au droit des entretoises longitudinales sur toute la hauteur et par six autres intermédiaires; des cornières de $\frac{90 \times 90}{9}$ et trois fers en U en raidissaient les âmes.

La tôle de la queue restait libre sur 138 cm. sur le reste de sa longueur soit 162 cm., elle était supportée par autant de consoles que l'avant-bec; seulement les consoles intermédiaires aux entretoises n'avaient que 0,65 m. de hauteur pour laisser un libre passage aux vérins.

Les dimensions extrêmes de l'appareil ainsi construit étaient : longueur 6,750 m., largeur 8,648 m. hauteur 3,924 m.

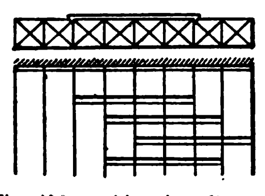


Fig. 150. — Plancher d'appui sur le sol.

Pour progresser le bouclier glissait par les quatre plaques d'appui dont nous avons parlé sur un plancher (fig. 150) formé de poutrelles en chêne de 20/20 cm. d'équarrissage placées perpendiculairement à l'axe ; chaque poutrelle était formée de deux morceaux ayant l'un les deux tiers de la longueur, l'autre le tiers ; on les plaçait à joints recoupés et on les liait les unes aux autres par un fer plat recourbé à ses extrémités.

Vérins et machinerie. — Les vérins étaient de 100 t. ; ils étaient au nombre de huit disposés entre les entretoises longitudinales ; une couronne de rivets de 30 et 35 mm. les fixaient aux deux poutres avant et arrière. Leur longueur totale y compris la tête d'appui du piston était de 1,550 m. La course des pistons était de 900 mm., leur diamètre de 22 cm., la surface d'action de chaque presse était donc de 380 cm.

On marcha souvent à 200 kg. par centimètre carré, soit un effort par vérin de 76 t. et un effort total de 608 t.

Le retour en arrière s'effectuait au moyen de petits vérins de rappel de 920 mm. de diamètre extérieur placés soit au-dessus du vérin principal, soit par côté : 250 mm. de distance séparaient les deux axes on avait prévu neuf vérins dont trois à hauteur du plancher inférieur, mais celui qu'on devait placer au droit de l'axe ne fut jamais monté.

La dynamo et les pompes étaient logées entre les deux poutres maîtresses à la partie supérieure, sur un plancher formé de deux fers en U de 160 × 60 mm. ; la robinetterie et les vannes de commande étaient disposées latéralement, à droite ; de cette manière la section laissée libre par l'engin était entièrement dégagée sur 1,976 m. de hauteur sous clef et 5,060 m. de largeur au niveau des naissances.

Charpente d'appui. — Pour la progression du bouclier les

vérins prenaient appui sur une charpente en bois soigneusement équarris et assemblés.

Chaque ferme (fig. 151) était formée d'une poutre inférieure horizontale de 6,60 m. de longueur et 30/30 cm. d'équarrissage dans laquelle étaient implantées 4 pièces verticales de 25/25 cm. d'équarrissage ; les deux pièces médianes avaient 2,63 m. de hauteur ; elles étaient reliées entre elles à leur partie supérieure par

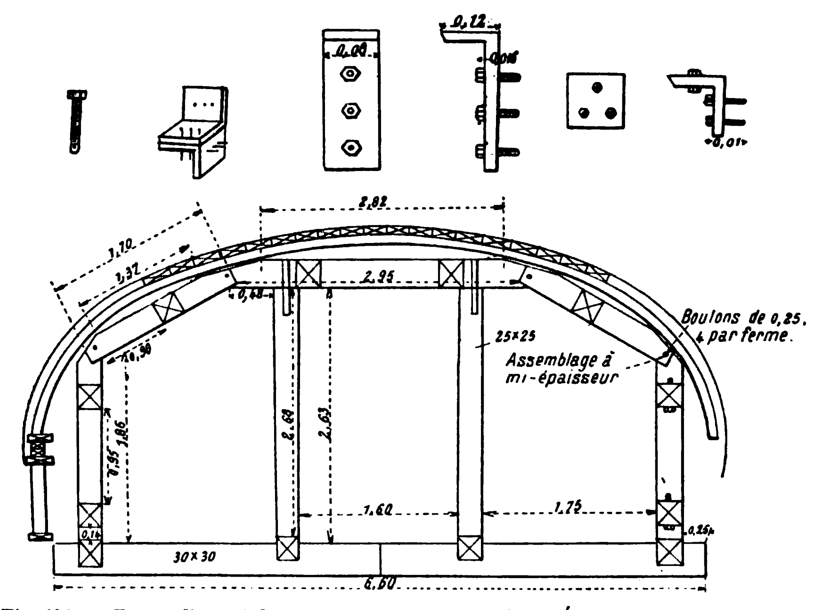


Fig. 151. — Ferme d'appui des vérins et cintre métallique. Élévation. Détails des fers.

une traverse horizontale de 2,95 m. et aux pièces extrêmes dont la hauteur n'était que de 1,86 m. par deux traverses inclinées de 1,70 m. de longueur.

Les différentes fermes de la charpente, au nombre de 20, étaient distantes de 1,80 m. d'axe en axe ; on en formait un tout solidaire au moyen de 12 longerons longitudinaux, de 1,50 m. de longueur, placés 4 entre les poutres inférieures et 8 sur le pourtour au droit des axes des vérins.

Toutes les pièces d'une même ferme étaient assemblées à mi-bois et boulonnées.

Quant aux longerons, ils s'attachaient aux fermes par des consoles en fer fixées dans le bois par 3 tire-fond de 0,16 m. et bou-

lonnées entre elles ; quand on avait avancé de 1,80 m. on démontait le dernier élément de la charpente et on le portait en tête.

Cintres. — Sur chaque ferme on calait un léger cintre (fig. 152) métallique descendant jusqu'aux naissances et portant les cou-

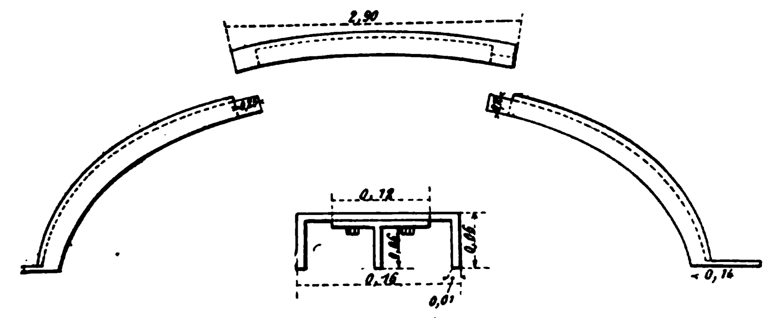


Fig. 152. — Cintre en fer. Élévation et coupe.

chis ; ce cintre était formé de 3 segments assemblés après réglage ; il se composait d'un fer à Té de $\frac{120 \times 60}{10}$ rivé à l'intérieur d'un fer en U de $\frac{160 \times 60}{10}$.

Entre 2 fermes on plaçait en outre sur les 2 longerons supérieurs une sorte de vau qui servait à soutenir les couchis en leur milieu et les empêchait de flamber.

La charpente, non ancrée dans les maçonneries, ne résistait à la poussée des vérins que par sa masse et par le frottement qui résultait sur le sol et sur les couchis du poids de la voûte seulement : celle-ci étant clavée, le cintre n'avait pas en effet à supporter le poids des terres supérieures.

1° BOUCLIER DU BOULEVARD DIDEROT

(Deuxième lot.)

Montage et essais. — Le bouclier du deuxième lot n'eut pas une carrière brillante : il fut en effet abandonné après un parcours de 41,54 m.

Il devait aller au-devant du bouclier de la rue de Reuilly en suivant au départ sur 436,36 m. une pente de 1,054 mm. par mètre

(fig. 153) ; en plan, son tracé comportait une courbe de 200 m. de rayon sur 14,25 m. de longueur et le reste en alignement droit.

Il aurait dû parcourir en réalité plus de 700 m., mais l'Entrepreneur qui avait déjà commencé le percement sur bois comptait limiter sa course à 273,63 m. au maximum.

Il fut monté entre l'emplacement de la prison Mazas et l'avenue Daumesnil ; l'opération, commencée le 3 février 1899, ne fut achevée que le 20 mars suivant ; elle fut conduite d'une façon très irrégulière en raison du retard, des intermittences et du manque d'ordre apportés dans l'approvisionnement des pièces. Si le travail avait été ininterrompu, avec cinq ouvriers monteurs, il aurait pu être terminé le 3 mars, c'est-à-dire 17 jours plus tôt.

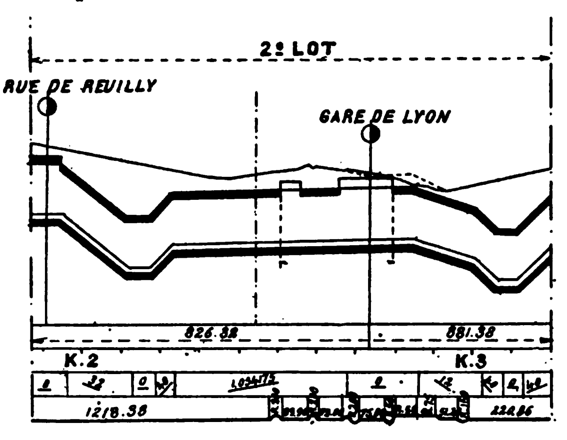


Fig. 153. — Profil en long du 2e lot.

Les vérins furent essayés le 17 mars : on dut démonter et remplacer deux d'entre eux utilisés en réemploi.

Le 28 mars on réalisa le premier avancement : un mètre en deux courses de 0,50 m.

Fonctionnement du bouclier, évacuation des déblais à l'arrière. — Les terrassiers placés sous l'avant-bec procédaient à l'abatage du front ; ils jetaient et régalaient leurs déblais sur un plancher en bois établi sur les semelles du bouclier ; de là les matériaux étaient repris par des manœuvres et chargés directement sur des wagons ; ceux-ci accédaient sur le plancher par une rampe qui suivait le bouclier ; ils redescendaient par le même chemin,

entraînés par la gravité; la voie était placée dans l'axe de la section ; les parties latérales servaient à l'approche des matériaux au moyen de brouettes.

La traction des rames de wagons devait s'exercer par une locomotive électrique ; mais l'engin livré à l'Entreprise avait un écartement d'essieux excessif ; entre autres nombreux défauts, il déraillait quand il réussissait à marcher; on l'abandonna et ce furent des chevaux qui conduisirent les trains aux monte-charges.

Quand le bouclier avait fait deux courses, c'est-à-dire avait avancé de 1,80 m., on procédait au démontage du dernier élément de la charpente et à son report en tête.

Exécution de la maçonnerie. — Les piédroits étaient montés sur une hauteur de 1,50 m. en contre-bas des naissances au fur et à mesure de l'avancement et la voûte exécutée ensuite sur cintre, non par échelons, mais par tronçons entiers de 0,90 m. de longueur en moyenne, à l'abri de la tôle d'arrière.

Les piédroits devaient être plus tard repris en sous-œuvre par les procédés ordinaires.

Personnel, équipes. — Les équipes d'ouvriers employés au travail sous le bouclier étaient ainsi composées :

1 électricien ;

4 terrassiers à l'abatage du front ;

4 terrassiers à la reprise des déblais et à leur chargement sur wagon.

1 charpentier pour la pose des fermes avec l'aide des 8 terrassiers précités ;

3 maçons et 6 garçons pour la construction du revêtement maçonné à l'arrière.

Avec un personnel aussi restreint (comparé à celui du premier lot) on ne pouvait espérer réaliser un avancement rapide : la marche fut en effet très lente, mais la disposition de l'engin et des moyens d'évacuation ne permettait pas l'augmentation des équipes.

Organisation générale du chantier. Installations mécaniques. — L'extraction des déblais s'effectuait au moyen de monte-charges établis sur l'ancien emplacement de Mazas, au coin du boulevard Diderot et de la rue Legraverend (fig. 154) ; à la sortie des monte-

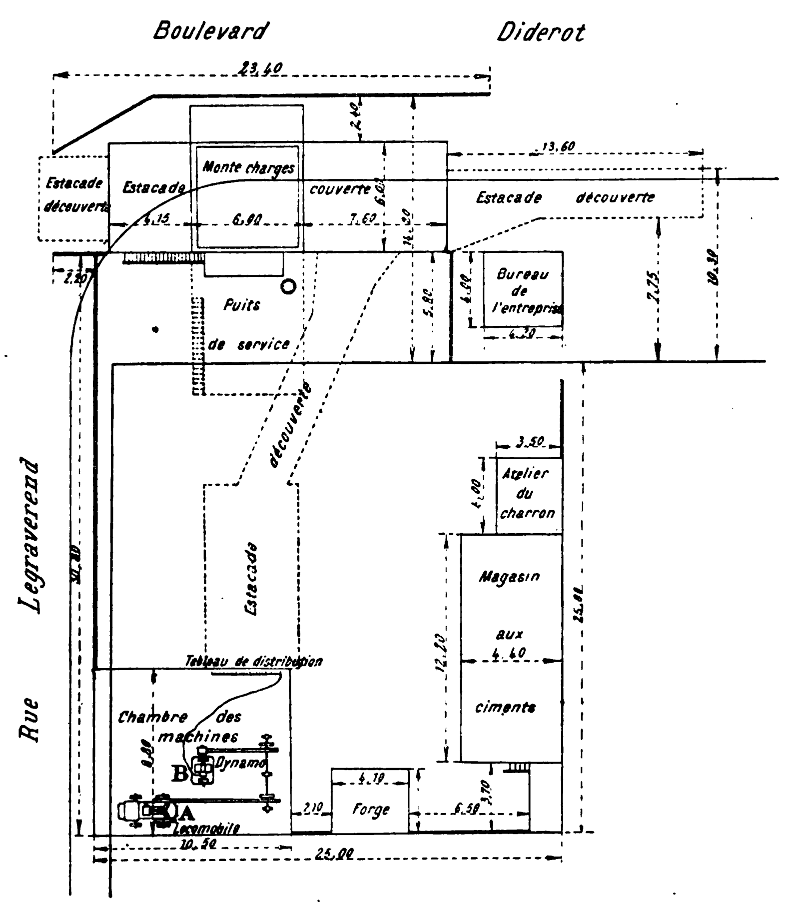


Fig. 154. — Organisation générale du chantier Mazas.

charges les matériaux étaient déversés à terre puis repris, chargés dans des tombereaux et conduits sur le quai de la Rapée : là on les jetait dans des bateaux du haut d'une estacade en bois.

Pour satisfaire au faible débit de l'extraction il ne fallait qu'un petit nombre de véhicules et de charrois ; de là cette fausse manœuvre de déblais jetés sur le sol d'une hauteur de 4 m. pour être repris quelques instants plus tard.

L'installation mécanique du chantier n'était pas spéciale au bouclier ; elle servait à toute cette portion du deuxième lot et notamment à la construction de la station de Lyon et du souterrain qui lui fait suite. Pour cette raison et pour celle-ci que la marche du bouclier fut de courte durée, nous ne croyons pas utile de la décrire en détail.

Le monte-charges était du système Bernier; il se composait d'une seule plate-forme sur laquelle pouvaient tenir deux wagonnets.

Une locomobile à chaudière tubulaire à flamme directe timbrée à 6 kg. et de la force de 35 chev. actionnait une machine Gramme tournant à 860 tours par minute et débitant 150 ampères sous 220 volts; le courant produit servait à la marche du bouclier, des monte-charges et de la lumière.

Terrains rencontrés. — Le terrain dans lequel le bouclier a fonctionné est formé à sa partie supérieure d'une couche de remblai de 2,60 m. d'épaisseur environ sous laquelle sont des sables et graviers jusqu'en contre-bas du dessous du radier du Métropolitain; cette dernière couche était de très bonne tenue alors que celle supérieure était absolument désagrégée.

De la gare de Lyon à la rue Crozatier il n'y avait pas d'eau, même au niveau du radier; c'est à peine si on a rencontré la nappe à la base des fondations de la station de Lyon.

Au départ on a rencontré un vieil égout, situé très obliquement par rapport au tracé; il a fallu démolir cet ouvrage sur 21 m. de longueur environ ce qui ne s'est pas fait sans difficulté en raison du biais.

Plus loin, dans les terrains de remblai il fallait éviter soigneusement les tassements en raison de la présence sur la chaussée des voies du tramway électrique *Charenton-Bastille* croisant la ligne à traction animale *Montreuil-Châtelet.*

Vitesse de marche. — Le bouclier mis en marche le 28 mars 1899 fonctionna jusqu'au 2 août de la même année ; en tenant compte d'un arrêt du chantier du 27 avril au 18 juillet pour réfection des piles du pont de chemin de fer de Vincennes, boulevard Diderot,

il parcourut 40,44 m. en 46 jours, soit une moyenne quotidienne de 0,920 m. Si on déduit de ce laps de temps 9 jours de chômage, la vitesse journalière s'élève à 1,12 m. seulement; il aurait fallu avec une telle lenteur, 260 jours pour effectuer le percement jusqu'à la rencontre de la partie sur bois (fig. 155).

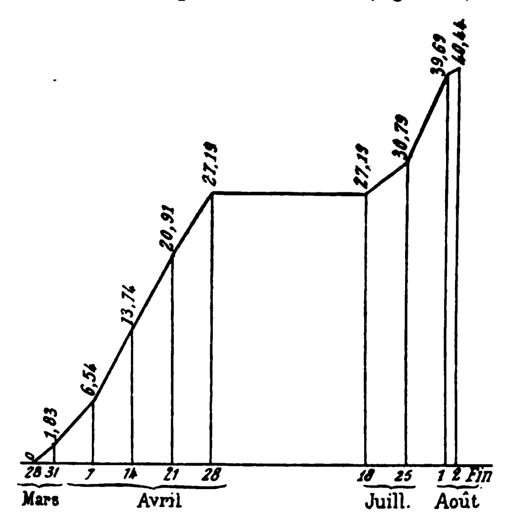


Fig. 155. — Diagramme de marche du bouclier.

La plus petite vitesse du bouclier fut de 0, 25 m. le 30 mars, au travers du vieil égout, la plus grande de 1,98 m. le 31 juillet.

Incidents et avaries. — L'engin levait constamment du nez; ceci tenait surtout à un vice de construction; la longeur de sa queue était en effet de 44,5 p. 100 de sa longueur totale alors que le corps proprement dit ne représentait que 22,2 p. 100 de cette longueur. Dès que les vérins sortant de leur logement s'avançaient sous l'arrière-bec, tout naturellement le bouclier était sollicité à se renverser en arrière ; les terrains traversés plus ébranlés à l'arrière qu'à l'avant, chargeaient inégalement l'enveloppe et accentuaient cette fâcheuse tendance : le plancher d'appui enfin tassait fréquemment sous l'effort auquel il était soumis ; pendant la course le frottement de la tôle sur la maçonnerie fraîche la désagrégeait et l'entraînait, produisant des fissures dans tous les sens.

On bouchait les fissures avec du mortier de ciment injecté sous pression.

Pour remédier à ce grave inconvénient dans la mesure du possible, on plaçait au début de la course des chandelles obliquement sous la tôle, s'appuyant les unes A (fig. 156) sur des semelles posées sur le sol, les autres B sur les couchis ; ces pièces de bois

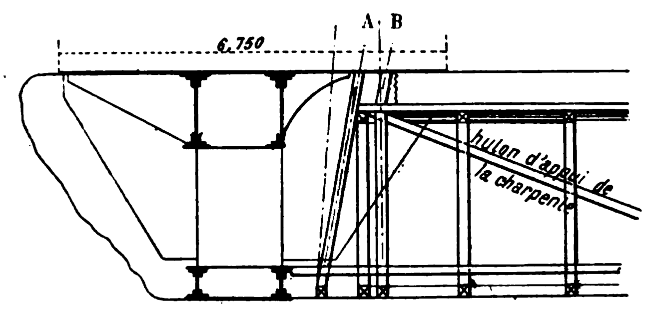


Fig. 156. — Dispositif employé pour éviter le renversement du bouclier en arrière.

(dont les grandes A étaient frettées à chaque extrémité) se redressaient à mesure de l'avancement en se rapprochant de la verticale et en soulevant la tôle.

La charpente d'appui n'offrait pas une résistance suffisante à la poussée des vérins ; insuffisamment chargée par la voûte sous laquelle on la calait fortement, elle reculait et se déversait ; on dût l'appuyer par quatre forts étais inclinés et la consolider par des écharpes intercalées dans les panneaux longitudinaux.

Enfin mal conduite par des ouvriers non exercés et ignorants, la machinerie, vérins et transmissions électriques, subit de nombreuses avaries.

Du 27 avril au 17 juillet inclus le travail fut interrompu pour permettre la reprise en sous-œuvre des fondations du pont du chemin de fer de Vincennes, sur le boulevard Diderot. Ce pont est porté par des colonnes en fonte reposant sur des massifs maçonnés, on souleva le tablier avec des vérins et on le soutint par des palées *ad hoc* ; les colonnes furent suspendues par trois contre-fiches butant à leur sommet un collier placé sous l'astragale supérieure ; pour plus de sécurité un paquet de rails jointifs fut placé sous la base de chaque colonne. Les fouilles et

les maçonneries furent exécutées en sous-œuvre jusqu'à 8,20 m. de profondeur en dessous du niveau du trottoir du boulevard Diderot, soit à 0,25 m. en contre-bas du radier du Métropolitain.

Le travail n'apporta aucun trouble dans la marche des trains du chemin de fer de Vincennes.

Conclusion. — En raison de son faible rendement, l'entrepreneur renonça à utiliser plus longtemps son engin, et reprit la méthode sur bois; le bouclier fut démonté entièrement sauf la tôle qui resta emprisonnée dans la maçonnerie ; la charpente métallique désarticulée a été remisée, il n'apparaît pas qu'elle soit utilisable à nouveau sans beaucoup de frais.

Le plus grand défaut de cet appareil était son instabilité ; dans les boucliers Champigneul, qui fonctionnèrent d'une façon satisfaisante, le corps représentait 28 p. 100 de la longueur totale, et la queue 37 p. 100, or le corps de celui-ci n'était que de 22,2 p. 100 de la longueur entière alors que la queue en était les 44 p. 100.

La section laissée libre par les poutres maîtresses, quoique étroite, était bien dégagée puisque aucune partie de la machinerie n'y était logée, mais ce bénéfice était aussitôt perdu par l'emploi de la charpente d'appui extrêmement encombrante découpant le souterrain en trois portions étroites tellement chargées de bois qu'il était difficile d'y circuler.

Encore cette charpente coûteuse ne constituait-elle qu'un très mauvais appui : pas assez lourde par elle-même, trop peu chargée par le revêtement, elle reculait et se gauchissait quand elle ne se brisait pas ; dans ces conditions il était extrêmement difficile de maintenir le bouclier dans l'axe du tracé, surtout en courbe.

La répartition du poids de l'appareil et de sa charge par quatre glissières sur un plancher ayant la largeur de la section semblait devoir diminuer les chances de tassements ; mais il aurait fallu constituer le plancher par deux cours de bois se coupant à angle droit : lorsque le bouclier se cabrait, l'arrière seul portait, chargées d'une façon exagérée les dernières poutrelles d'arrière s'enfonçaient dans le sol et la queue baissait davantage.

Etant donné le faible avancement journalier (1 m. environ) la forme des poutres qui permettait l'exécution des piédroits dans le

corps même du bouclier devenait inutile ; les maçons avaient tout le temps voulu pour exécuter dans son entier l'anneau du revêtement ; il eût mieux valu prolonger le plancher inférieur jusque sous les retombées ; on aurait ainsi augmenté la section libre et facilité le travail d'abatage.

Il y avait d'ailleurs un vice regrettable dans l'organisation de ce travail ; c'était perdre un temps considérable que de jeter et de régaler les déblais sur le plancher pour les reprendre après et les charger en wagon ; le mode de fonctionnement du chantier d'attaque du premier lot était de beaucoup supérieur à celui-ci.

2° BOUCLIER DE LA RUE DE LYON

(*Troisième lot.*)

Deux boucliers du type Dioudonnat fonctionnèrent dans le troisième lot.

Le premier [1] partit non loin de la place de la Bastille, après la portion couverte d'un tablier métallique et chemina sous la rue de Lyon jusqu'à la station de raccordement à la gare du P.-L.-M., sur une longueur de près de 800 m.

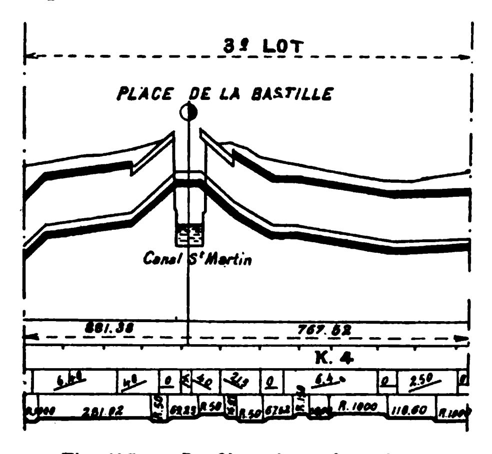


Fig. 157. — Profil en long du 3e lot.

Du tracé. — Dans cette partie le tracé présente une pente de 6,40 mm. par mètre sur 217,16 m. de longueur puis une pente de 40 mm. sur 136,81 m., un palier de 50 m., une rampe de 40 mm. sur 56,07 m. et une rampe de 12 mm. sur 170,55 m. (fig. 157).

En plan après un alignement droit de 281,02 m., on rencontre

[1] Chronologiquement ce bouclier ne fut pas le premier, car il ne fut mis en service qu'un mois après celui de la rue Saint-Antoine ; mais nous suivons le tracé du Métropolitain toujours dans le même sens, d'une extrémité à l'autre.

une courbe de 1 000 m. de rayon sur 24,87 m. de longueur, un nouvel alignement droit de 220,86 m., une courbe de 150 m. de rayon sur 18,54 m., un alignement droit de 51,20 m. et une courbe de 75 m. de rayon sur 62,18 m. suivie d'une autre de 50 m. de rayon sur 54,11 m.

Montage et essais. — Le bouclier fut monté au droit de la rue Biscornet du 17 mars au 6 avril 1899 ; les essais furent faits le 7 avril.

Fonctionnement, maçonnerie. — Le fonctionnement était analogue à celui du bouclier précédent. Deux madriers posés dans l'avant-bec sur des barres de fer accrochées aux poutres maîtresses formaient un plancher volant supportant les terrassiers; on avait d'abord installé un plancher fixe avançant jusqu'à l'aplomb de la tôle supérieure; mais en raison de la grande hauteur des poutres de soutien, les hommes se trouvaient comme enfermés dans la chambre de travail, en cas d'éboulement leur position était très critique ; on commençait l'abatage par le haut, on le continuait par le bas ; les déblais étaient évacués comme dans le deuxième lot.

L'avancement correspondant à la distance de 1,80 m. qui séparait deux fermes consécutives s'effectuait en deux fois ; dans l'une on parcourait 0,60 m., dans l'autre 1,20 m.; comme la course des vérins n'était que de 0,90 m. il fallait dans la deuxième opération faire rentrer les pistons, interposer des butons, et remettre les pompes en marche.

On construisait la maçonnerie du revêtement par anneaux complets, jusqu'à la console de la poutre arrière ; les piédroits étaient exécutés d'abord jusqu'à 1,50 m. au-dessous des naissances ; ils étaient ensuite repris en sous-œuvre partiellement dans des fouilles blindées de 2,30 m. de longueur espacées de 2 à 3 m., puis totalement plus tard après l'enlèvement du grand stross.

Le radier ne fut construit que longtemps après.

Equipes. — Le personnel employé au travail comprenait en moyenne :

Trois mineurs, quatre terrassiers, deux boiseurs pour la pose des fermes ; quatre maçons et cinq aides.

Le transport des déblais s'effectuait avec un charretier, un garde-frein et deux chevaux. Un tracteur électrique du même modèle que celui du deuxième lot n'avait pas davantage marché et restait inutilisé.

Les wagonnets de 600 l. étaient au nombre de 90 environ ; quatre trains à l'heure suffisaient à l'enlèvement des terres provenant de l'avancement ; par une galerie boisée construite à l'avance ils les conduisaient sur une estacade longeant le canal Saint-Martin, de là on les jetait en bateau.

Installation mécanique du 3e lot. — Une locomobile tubulaire à flamme directe de 30 chx était installée quai Bourdon, près de l'origine du chantier de la rue Saint-Antoine. Elle actionnait une dynamo Gramme qui fournissait 100 ampères sous 220 volts (soit 22 kilowatts), énergie nécessaire à la marche des deux boucliers et à l'éclairage des deux souterrains du lot : les dynamos des boucliers consommaient 35 ampères sous 220 volts (8,4 kilowatts).

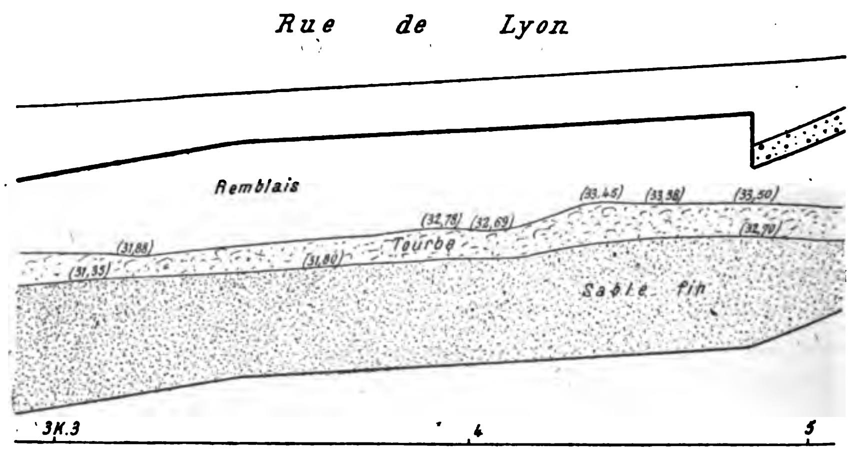


Fig. 158. — Coupe géologique des terrains rencontrés par le bouclier de la rue de Lyon.

Terrains rencontrés. — Les deux boucliers travaillèrent dans des terrains de remblais ou des sables coupés de vieilles maçonneries ; ils ne rencontrèrent pas la nappe d'eau (fig. 158).

Vitesse. — Mis en marche le 12 avril 1899, le bouclier de la rue de Lyon fonctionna jusqu'au 28 juin de la même année; pendant ces quatre-vingts jours il parcourut 164 m.; son avancement journalier moyen fut donc de 1,95 m. (fig. 159). Si l'on met à part la première semaine ou par suite de tâtonnements et de réparations d'avaries il n'avança que de 3,60 m., on voit que sa plus petite vitesse fut de 1,75 m. par jour pendant la semaine du 7 au 13 juin et sa plus grande de 2,75 m. du 3 au 9 mai.

Il était encore en bon état quand on l'arrêta le 28 juin mais la charpente d'appui était très abîmée.

Fig. 159. — Diagramme de marche du bouclier de la rue de Lyon.

Direction. — Pour assurer la direction de l'appareil en hauteur, il suffisait de disposer la surface de glissement suivant un plan parallèle au plan des rails, ce qu'on faisait avec un niveau à bulle d'air à vis de réglage; en prévision des tassements on maintenait d'ailleurs toujours ce plancher à 0,06 m. au-dessus de sa position définitive.

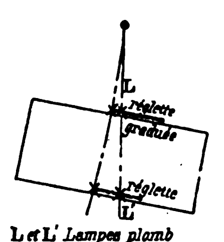


Fig. 160. — Direction du bouclier en plan.

On vérifiait l'alignement en plan par des sondages à travers la chaussée, au moyen de deux lampes plomb dans le bouclier et deux autres sur l'alignement (fig. 160). En courbe, les lampes plomb du bouclier étaient attachées à des réglettes mobiles sur lesquelles on avait déterminé très exactement la partie de rayon prolongé comprise entre la courbe et la tan-

gente. On amenait le bouclier dans la bonne direction en arrêtant les vérins du côté intérieur de la courbe, sur le plus petit rayon.

Incidents. — Ce bouclier présentait tous les défauts que nous avons déjà signalés, il avait un mouvement de galop continuel; une parallèle aux génératrices avait été tracée sur les joues des poutres maîtresses; de temps en temps on relevait sa position; on constata souvent que par rapport à la direction suivie l'avant et l'arrière de l'appareil présentaient une dénivellation totale de 0,40 m., ce qui correspondait, vu sa longueur, à une pente de près de 6 cm. par mètre.

On ne réussissait à marcher convenablement qu'en arrêtant les deux vérins inférieurs immédiatement après le départ et en s'opposant au mouvement de bascule par des étais inclinés sous la queue (comme dans le deuxième lot).

Il n'y avait guère au-dessus de l'enveloppe qu'une hauteur de terre de 1,20 m., 1,00 m. et même 0,80 m.; des tassements importants se produisaient ; la chaussée s'affaissait sur les 2/3 environ de la largeur du souterrain et prenait une flèche variable entre 0,05 m. et 0,35 m.; le passage des voitures ne pouvait s'effectuer qu'à droite et à gauche du bouclier mais pas sur lui.

A l'arrière on refaisait le pavage à mesure. Pour remédier aux tassements on s'efforçait de bourrer, mais le plus souvent cette opération était impossible à réaliser, le terrain tombant sur la tôle aussitôt qu'elle avançait.

Sur les flancs, l'enveloppe descendait jusqu'au-dessous des naissances ; on ne pouvait donc pas serrer la maçonnerie des retombées contre le sol; au décintrement, la voûte insuffisamment chargée aux reins se fissurait à la clef; le bourrage au sable qu'on effectuait sur les flancs ne réussissait pas toujours à éviter ce grave inconvénient : il aurait fallu couper les tôles à leur partie inférieure.

A l'arrière, au contraire, le biseau de la visière était trop aigu pour la longueur de 1,20 m. qu'on donnait aux courses; après chaque course une portion du sol était mise à nu entre la voûte

déjà faite, le piédroit et la tôle (fig. 161); on remédia à ce défaut en ajoutant une tôle descendue verticalement jusqu'à hauteur des naissances (fig. 162).

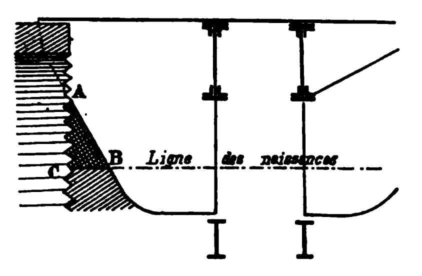


Fig. 161. — A B C, partie du sol mise à nu par le bouclier.

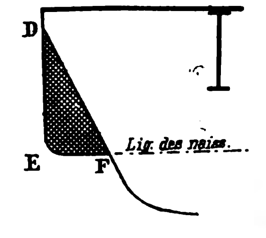


Fig. 162. — D E F, tôle ajoutée au bouclier de la rue de Lyon.

On contrebutait la première ferme de la charpente (fig. 163) par quatre forts étais inclinés de 7,50 m. de longueur et 30/30 cm.

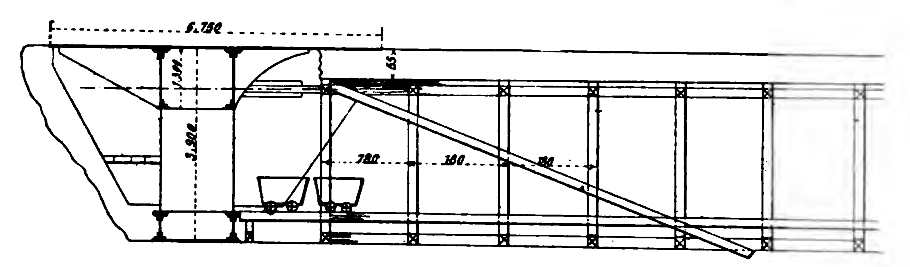


Fig. 163. — Coupe longitudinale du chantier montrant les étais.

d'équarrissage; mais on ne plaça jamais ici d'écharpes dans les panneaux longitudinaux.

3° BOUCLIER DE LA RUE SAINT-ANTOINE

(Troisième lot.)

Projet. — Le bouclier de la rue Saint-Antoine devait cheminer de la place de la Bastille à la station Saint-Paul.

Sur ce trajet de plus de 150 m. de longueur le tracé comporte une pente de 21,3 mm. sur 115 m., un palier de 50 m., une pente de 6,4 mm. sur 242,29 m., un nouveau palier de 50 m. et une rampe de 2,50 mm. sur 153,61 m.

En plan, il présente successivement une courbe de 50 m. de rayon sur 90,95 m., un alignement droit sur 67,52 m., une courbe de 150 m. de rayon sur 28,03 m., un alignement droit de 58,60 m., une courbe de 1 000 m. de rayon sur 149,66 m., un alignement droit de 110,60 m. et enfin une courbe de 1 000 m. de rayon et de 114,61 m. de longueur.

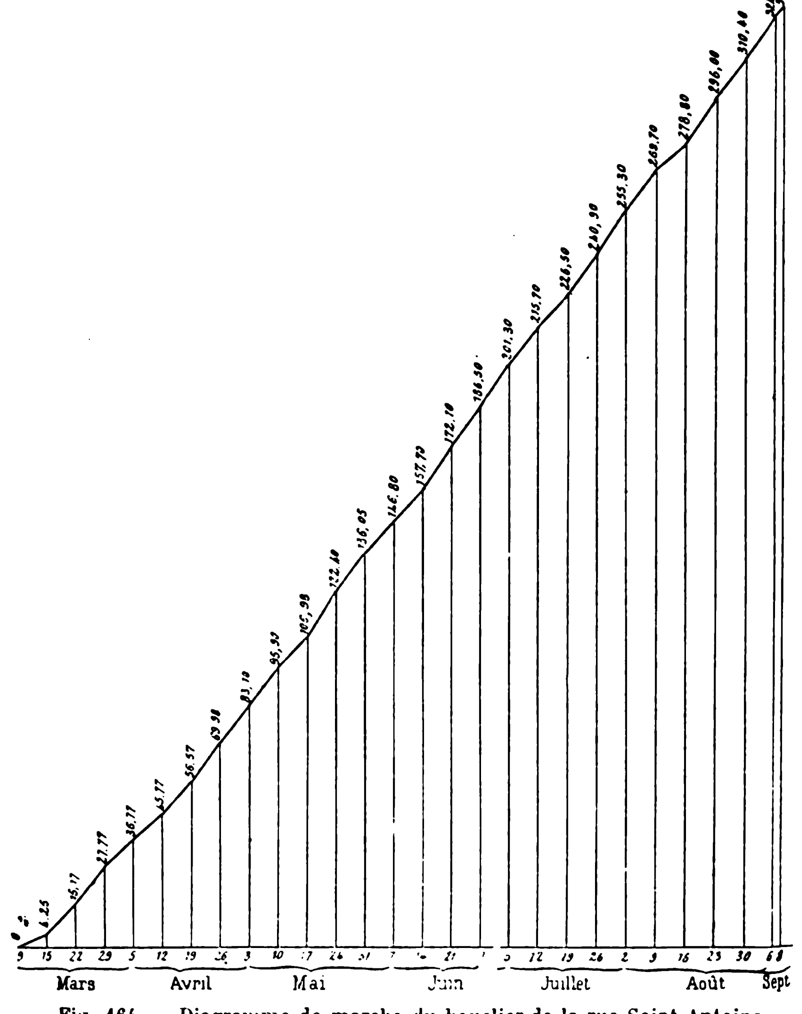


Fig. 164. — Diagramme de marche du bouclier de la rue Saint-Antoine.

Montage et essais, vitesse. — Le bouclier fut monté du 13 février au 7 mars 1899 au bout de la courbe de 50 m. de rayon

dans une chambre blindée sur deux côtés et maçonnée sur deux autres.

Il fit sa première course le 8 mars et fonctionna jusqu'au 8 septembre ; dans cet intervalle de temps il parcourut 328,10 m.; sa vitesse moyenne fut donc de 1,78 m. par jour (fig. 164).

Exception faite de la période d'essais pendant laquelle il fit 4,25 m. (du 9 au 15 mars), son plus grand avancement hebdomadaire fut de 17,20 m. (7-23 août), son plus petit 9 m. (30 mars, 5 avril, 12 avril); à ces chiffres correspondent les vitesses quotidiennes de 2,45 m. et 1,28 m.

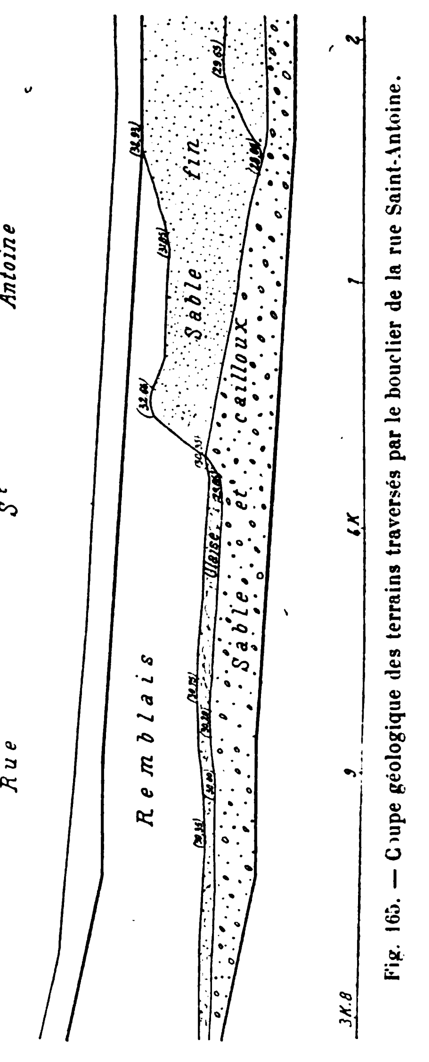


Fig. 165. — Coupe géologique des terrains traversés par le bouclier de la rue Saint-Antoine.

Il avança donc moins rapidement encore que le bouclier de la rue de Lyon ; ceci tint surtout au grand nombre de vieilles maçonneries qu'il rencontra ; dès son départ il se heurta à d'anciennes fondations de la Bastille qu'on eut beaucoup de peine à détruire.

Il cessa de fonctionner le 8 septembre et fut démonté entièrement. La tôle seule resta emprisonnée dans les maçonneries.

Equipes et fonctionnement. — Le personnel employé au travail sous l'armature comprenait :

Trois mineurs, quatre terrassiers, deux boiseurs, quatre maçons et cinq aides.

Il faut ajouter à ces dix-huit hommes deux charretiers, un

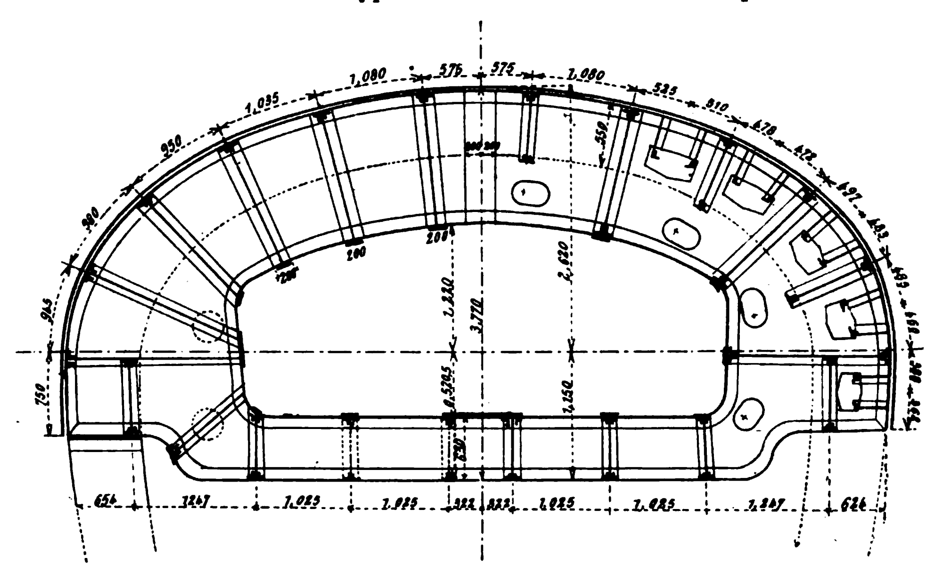
garde-frein et cinq chevaux occupés au transport des déblais ; ceux-ci conduits sur la rive du canal Saint-Martin qui longe le boulevard Bourdon étaient jetés en bateau directement.

La tôle d'arrière ne fut ici jamais modifiée : on continua à découvrir un peu le terrain par les courses de 1,20 m ; par bonheur il était peu ébouleux.

III. — BOUCLIERS WÉBER

QUATRIÈME LOT

Boucliers. — Il y eut deux boucliers mis en service dans le quatrième lot : celui de Saint-Paul et celui du Châtelet. Ils étaient du même modèle dit type Wéber du nom de l'entrepreneur ; ils



Demi-élévation de la poutre avant. Demi-élévation de la poutre arrière.

Fig. 166. — Coupe transversale du bouclier Wéber.

avaient été disposés pour l'emploi du béton comme revêtement et pour l'appui sur les piédroits construits à l'avance.

Chaque bouclier (fig. 166 et 167) se composait de deux tôles de 12 mm. d'épaisseur et 4,900 m. de longueur épousant la forme de

l'extrados et descendant jusqu'à 750 cm. au-dessous des naissances ; à l'avant ces tôles étaient découpées en visière, à l'arrière elles se terminaient normalement à l'axe ; elles étaient supportées par deux poutres maîtresses de forme identique, en tôle de 11 mm., distantes de 1,500 m. d'axe en axe, ces poutres descendaient à 1,150 m. au-dessous des naissances ; elles étaient évidées au centre par une ouverture de 1,720 m. de hauteur sur

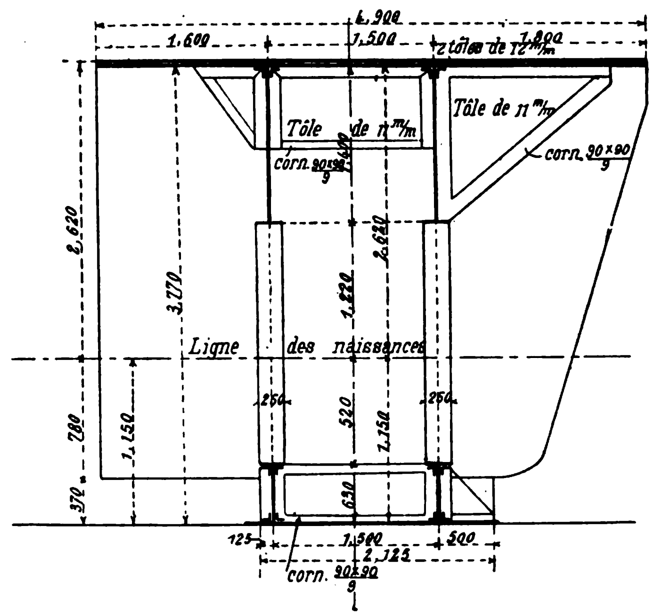


Fig. 167. — Bouclier Wéber : coupe longitudinale.

l'axe et 4,20 m. de largeur de telle sorte que la partie elliptique supérieure eût 1,400 m. de hauteur en clef et la traverse horizontale inférieure 630 mm. seulement ; celle-ci d'ailleurs n'avait pas toute la longueur de la section pour laisser la place des piédroits : une tôle continue de 2,125 m. de longueur était rivée sous les deux poutres et fermait l'intervalle.

Douze entretoises de 11 mm. d'épaisseur dont six entre les deux traverses inférieures reliaient les deux poutres maîtresses sur toute la hauteur de leur partie pleine ; six entretoises intermédiaires de hauteur moitié moindre pour laisser passer les grands vérins et deux autres verticales presque au droit du

parement intérieur des piédroits concouraient au même but.

Les trois parties de l'armature avaient pour longueurs :

L'avant-bec 1,800 m. ;

Le corps 1,500 m. ;

L'arrière-bec 1,60 m. ;

En tout 4,900 m.

La tôle de l'avant-bec était renforcée par douze goussets tous de même hauteur faisant suite aux entretoises, formés d'une âme de 11 mm., raidie et fixée par des cornières de $\frac{90 \times 90}{9}$. La tôle d'arrière en porte à faux sur 0,90 m. était soutenue sur le reste de sa longueur par six grandes consoles et six petites placées au-dessus des vérins.

La longueur totale de l'armature était de 4,900 m. ; sa hauteur de 3,770 m., sa largeur intérieure de 8,600 m.

Vérins. — L'appareil portait deux systèmes de presses. Dix vérins de 40 t. répartis sur le périmètre extérieur devaient servir à la compression du béton employé comme revêtement (fig. 168).

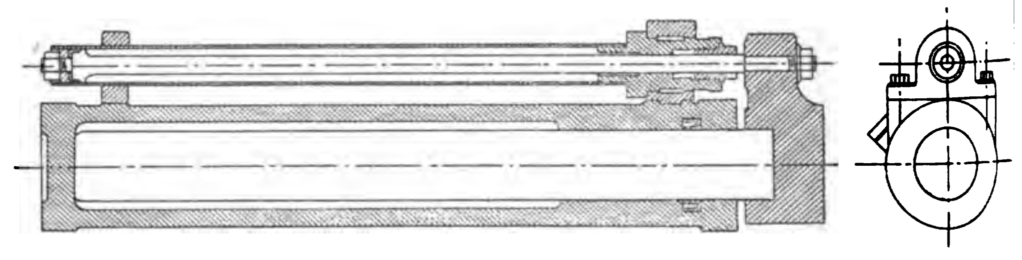


Fig. 168. — Coupe longitudinale et vue en bout d'un vérin de 40 tonnes.

Ils étaient logés entre les entretoises, et fixés à des supports spéciaux (fig. 169) formés de tôles de 11 mm. d'épaisseur et de cornières de $\frac{100 \times 100}{10}$. Leur longueur totale était de 1,680 m. ; la tête d'appui avait 240 mm. de diamètre, le piston plongeur 145 mm. et une course de 1 m. On faisait rentrer les presses avec de petits vérins de rappel ayant 78 mm. de diamètre extérieur ; la distance des deux axes était de 205 mm.

Huit gros vérins de 100 t. (fig. 170) placés au-dessous des petites entretoises servaient à la progression. La longueur totale

de ces vérins était de 1 095 mm.; le piston plongeur avait un diamètre de 226 mm., une course de 50 cm.; les vérins de

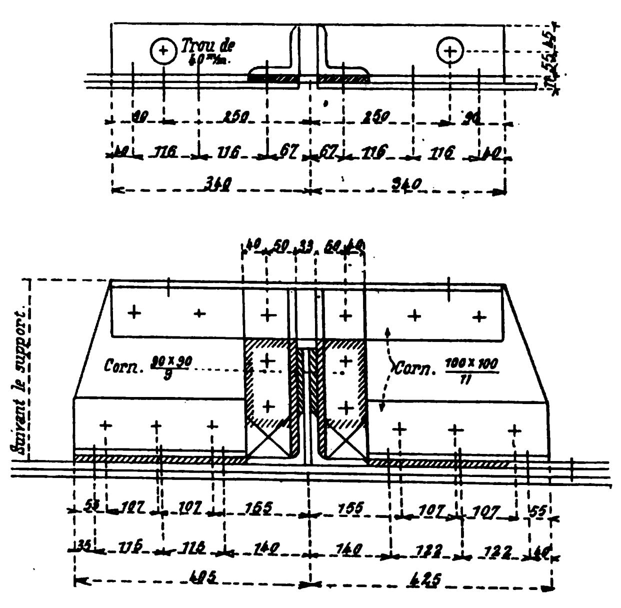


Fig. 169. — Détails d'un support de compresseur.

rappel distants d'axe en axe de 250 mm. des premiers avaient 92 mm. de diamètre.

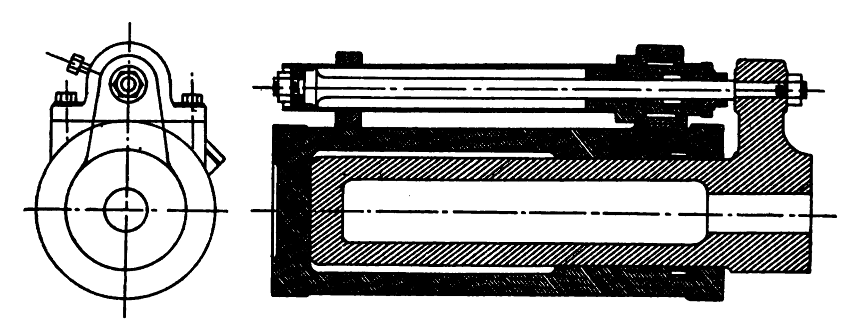


Fig. 170. — Coupe longitudinale et vue en bout d'un vérin de 100 tonnes.

Fonctionnement. — On construisait en trois périodes les piédroits sur lesquels le bouclier devait s'appuyer.

Dans la première phase (fig. 171) on ouvrait une galerie boisée de 1,50 m. de largeur au sommet; dans la deuxième par abatage

latéral, et en remplaçant successivement les chapeaux des cadres par d'autres de longueur plus grande on portait la largeur de la galerie à 2,80 m. environ, suivant le gabarit voulu ; dans la troisième phase enfin on maçonnait le revêtement.

Entre les piédroits et le plancher inférieur de l'armature on

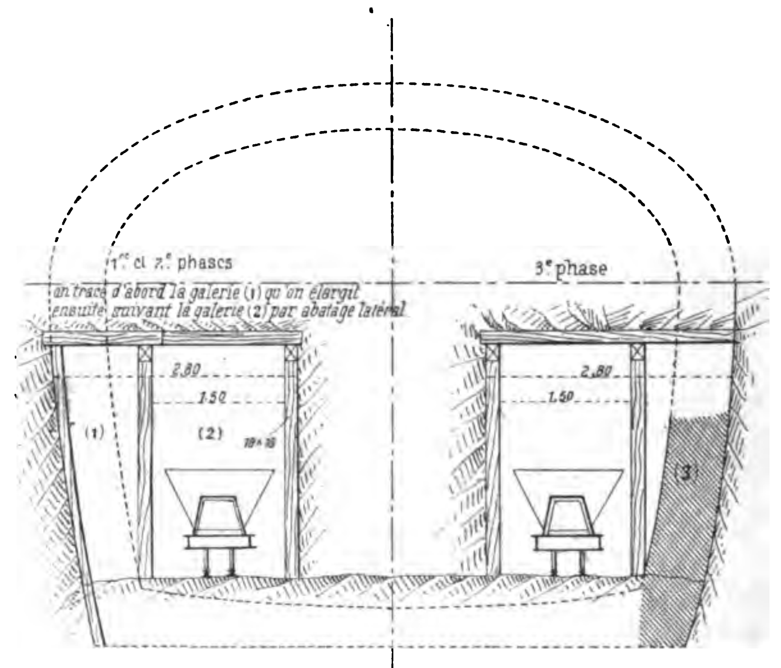


Fig. 171. — Construction des piédroits. — Trois phases.

interposait des semelles en sapin recouvertes d'un fer méplat de 10 cm. de largeur.

Le revêtement devait être en béton serré entre les couchis et la tôle de la queue ; au moment de l'avancement de l'armature les vérins de 40 t. devaient prendre appui sur ce béton ; quand la compression limite admissible était atteinte grâce à un dispositif particulier (et breveté) les valves d'admission se refermaient automatiquement, l'eau cessait de pénétrer sous les pistons plongeurs et revenait au réservoir, les petites presses ne servaient plus, les gros vérins de 100 t. entraient à leur tour en jeu et butant contre une charpente que nous allons décrire, poussaient l'engin en avant.

Le radier était maçonné plus tard après abatage du grand stross.

Charpente d'appui. — De mètre en mètre on encastrait dans les piédroits à 85 cm. au-dessous des naissances, des pièces de bois transversales de 30/30 cm. d'équarrissage formées de deux morceaux assemblés par des éclisses en fer ; à chacune de leurs extrémités ces pièces horizontales portaient un montant vertical

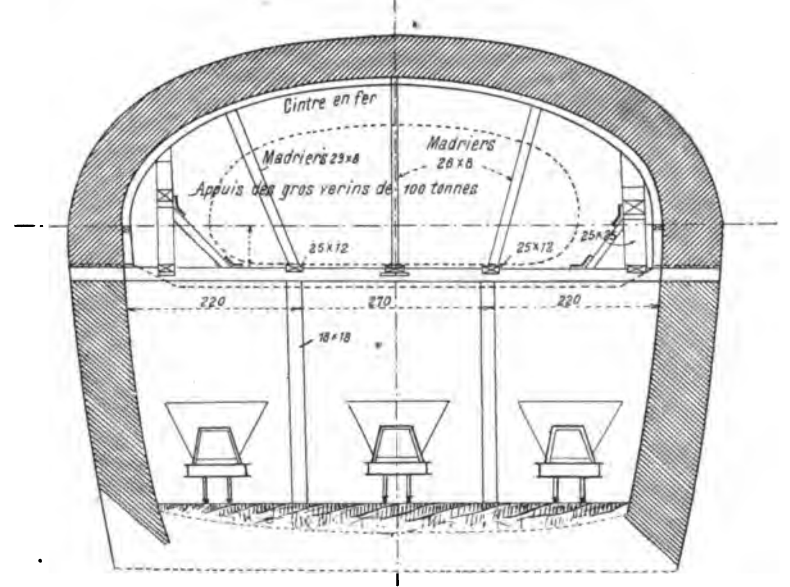


Fig. 172. — Charpente d'appui. Enlèvement du grand stross.

de 25/25 cm., appuyé par une pièce en écharpe et placé juste au droit des deux gros vérins latéraux (fig. 172). En plus de leur ancrage dans la maçonnerie les différentes fermes étaient entretoisées par six butons de 25/25 cm. placés deux entre les traverses horizontales et quatre entre les traverses verticales au droit des axes des presses ; elles reposaient en outre sur les montants des cadres des galeries.

Avec un pareil dispositif, des huit vérins du bouclier, quatre seulement pouvaient servir à la propulsion.

Tous les assemblages étant exécutés à mi-bois avec des équerres et des éclisses en fer, le démontage était facile ; après chaque course on enlevait le dernier élément pour le reporter en tête.

Cintres. — Les cintres étaient métalliques (fig. 173) et formés de deux fers en U de $\frac{180 \times 60}{8}$ et de $\frac{120 \times 40}{8}$ rivés à l'intérieur l'un de l'autre, ils étaient placés au droit de chaque ferme et soutenus par des calages et par trois madriers de 8/23 cm., l'un

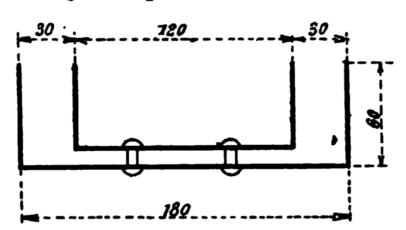


Fig. 173. — Coupe d'un cintre métallique.

vertical sur l'axe, les deux autres obliques butant au-dessus des montants des cadres des galeries.

Organisation générale des chantiers. — Les déblais jetés en arrière étaient repris par des terrassiers et chargés dans les wagons qui ne pouvaient pénétrer dans le bouclier. Au début les wagons étaient traînés par des hommes, plus tard ils le furent par des chevaux.

Pour le bouclier de l'Hôtel de Ville, l'évacuation s'effectuait par une galerie débouchant sur les quais de la Seine ; une estacade en bois permettait le déversement direct dans des bateaux.

Pour le bouclier du Châtelet, un monte-charge Bernier était établi à côté du square Saint-Jacques; un deuxième monte-charge s'élevait près de l'église Saint-Paul et desservait la partie du souterrain construite sur bois.

L'installation mécanique était concentrée sur le quai de l'Hôtel-de-Ville. Elle comprenait deux machines horizontales tubulaires à flamme directe, de la maison Hermann-Lachapelle; l'une de 50 chx, l'autre de 40, actionnant à tour de rôle une dynamo Hillairet-Huguet; celle-ci tournait à 400 tours par minute et sous une différence de potentiel de 220 volts.

L'énergie produite était utilisée pour la marche du bouclier, de l'éclairage, des monte-charges et d'une bétonnière.

La bétonnière du type Dupuits, à fonctionnement intermittent, pouvait fabriquer 30 m³ de béton par jour. Elle se

composait essentiellement d'une auge circulaire horizontale où des couteaux effectuaient le mélange; un wagonnet à deux compartiments montait le sable et le cailloux tout dosés ; on ajoutait directement le ciment; en ouvrant le registre de fermeture on faisait tomber le béton dans les wagons qu'on plaçait au-dessous.

Equipes. — Le personnel employé au percement des galeries était assez nombreux en raison des maçonneries rencontrées ; il comprenait par équipe et par galerie :

7 mineurs et 5 terrassiers ; on posait un cadre par poste, soit un avancement de 3 m. par jour.

Le revêtement était exécuté par 6 maçons servis par 9 garçons.

Sous l'armature on comptait par poste :

5 mineurs à l'abatage ;

13 terrassiers pour le chargement et le roulage.

La maçonnerie occupait 2 maçons et 4 garçons.

Terrains rencontrés. — Les terrains traversés se composaient, sur une forte épaisseur, de remblais et de gravois, puis de sable fin si pur qu'on put l'utiliser pour les maçonneries. Sur tout le parcours on se heurta à des hauteurs différentes, à l'ancien collecteur Rivoli, ce qui ralentit considérablement la marche.

Insuccès du bétonnage. Marche à ciel ouvert. — Dès le début on renonça à bétonner le revêtement ; les deux fois, en effet, où l'expérience fut tentée, elle échoua complètement, serré sous la tôle, le béton s'opposait à la marche de l'engin, jusqu'au moment où il partait avec lui, entraîné dans la course.

Or, l'appareil avait une queue trop courte pour qu'il fût possible de maçonner à son abri, commodément; on éprouvait d'autre part une très grande difficulté à cheminer au travers du collecteur ; on se décida donc à ouvrir une tranchée dans la chaussée, jusqu'à 2 m. de part et d'autre de l'axe du tracé ; le bouclier ne servait plus qu'à soutenir les flancs, il cheminait pour ainsi dire à blanc, sous l'effort de quatre de ses vérins seulement; on plaçait à mesure les fermes d'appui, on boisait, et, en arrière, à une distance variable, on bétonnait.

BOUCLIER SAINT-PAUL

Montage et essais. — Le premier bouclier devait aller dans la direction de la place de la Bastille ; il fut construit sur les piédroits, directement, dans une chambre boisée ouverte à l'amont de la station de l'Hôtel de Ville, près de la rue des Archives.

La première course fut de 0,50 m. le 26 avril 1899 ; le 1[er] mai on n'avait encore parcouru que 2,60 m.

Fonctionnement. — La première course eut lieu dans des conditions normales, mais bientôt après, la chaussée s'affaissa tellement qu'on craignit pour la sécurité publique et qu'on ouvrit une tranchée au-dessus de l'engin.

Pour isoler de la rue le chantier à ciel ouvert, on l'entoura d'une clôture roulante qui suivait l'avancement ; puis comme l'ébranlement des terres s'étendait latéralement à une distance telle que la circulation des voitures devenait dangereuse, on barra définitivement la rue de Rivoli entre la rue des Archives et la rue des Mauvais-Garçons. Les galeries des piédroits s'arrêtaient au droit de cette rue, on décida de ne pas les continuer et d'arrêter définitivement le bouclier en ce point.

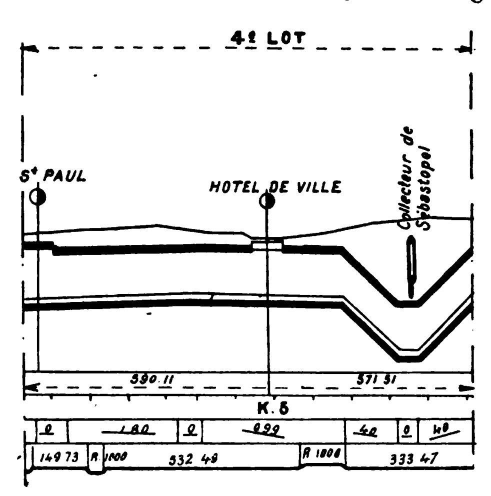


Fig. 174. — Profil en long du 4e lot.

Modifications. — On tenta d'allonger l'arrière-bec, trop court, au moyen de fers en U assemblés sur la carapace et supportant les tôles ; mais ces fers en porte à faux fléchirent sous les poussées latérales des terres ; le frottement sur les maçonneries fut tel, qu'un anneau de voûte entier fut arraché ; il fallut les démonter et les enlever.

Vitesse de marche. — Le bouclier fut arrêté le 20 juin, après un parcours total de 42,28 m.

La fraction de souterrain qu'il servit à construire (fig. 174) était en alignement droit, en rampe de 0,99 mm. par mètre.

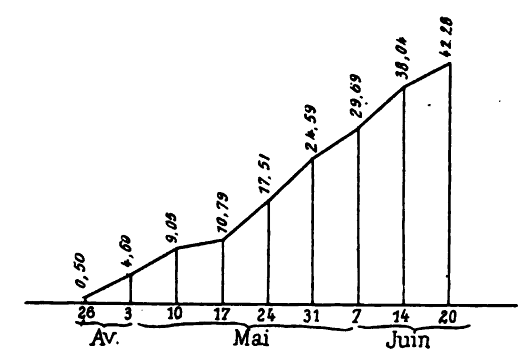


Fig. 175. — Graphique de marche. Bouclier Saint-Paul.

La plus grande vitesse journalière fut de 1,95 m. (le 4 juin). Mais étant donné que le fonctionnement se fit à ciel ouvert, il n'y a aucun enseignement à tirer pour la méthode même de l'étude du graphique de marche (fig. 175).

BOUCLIER DU CHATELET

Montage et essais. — Le bouclier du Châtelet fut construit dans la station même, à l'aval; une fouille boisée ouverte en face de la rue du Temple aurait gêné la circulation et accru les dépenses.

La chambre fut commencée le 16 février 1899. Le montage de l'armature et la pose des butées durèrent du 24 mars à la fin de mai. La première course fut de 0,30 m.; elle eut lieu le 26 mai. Le 1er juin on n'avait encore parcouru que 1,59 m.

Fonctionnement. Arrêt. — Le bouclier marcha continuellement à ciel ouvert, d'abord en alignement droit, puis suivant une courbe de 1 000 m. de rayon; il descendit suivant le profil en long (fig. 174), soit avec une pente de 0,99 mm. par mètre et s'arrêta le 27 juillet au point où commence la déclivité de 40 mm.;

il avait parcouru en tout 96,63 m. (fig. 176); sa vitesse journalière maxima fut de 3,48 m. (le 5 juillet).

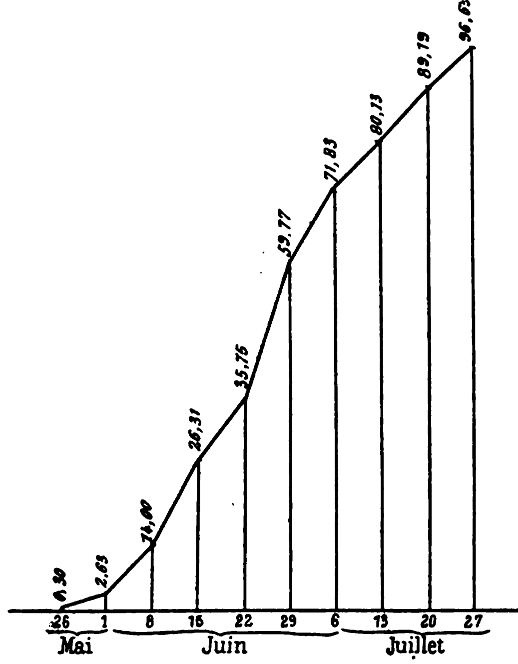


Fig. 176. — Graphique de marche. Bouclier du Châtelet.

Conclusions. — En résumé, les boucliers Wéber n'ont ni l'un ni l'autre fonctionné dans des conditions normales; on peut cependant leur adresser plus d'un reproche et affirmer qu'en travail souterrain ils auraient donné de très mauvais résultats.

D'abord, la compression du béton sous la tôle même de la queue par les presses destinées à produire l'avancement n'est pas une opération réalisable : plus la pression est énergique, plus le frottement sous l'enveloppe est considérable et s'oppose à la progression.

D'autre part, quoique ancrée, la charpente d'appui était mal disposée : trop légère, elle n'utilisait que 4 vérins seulement, ce qui est certainement trop peu.

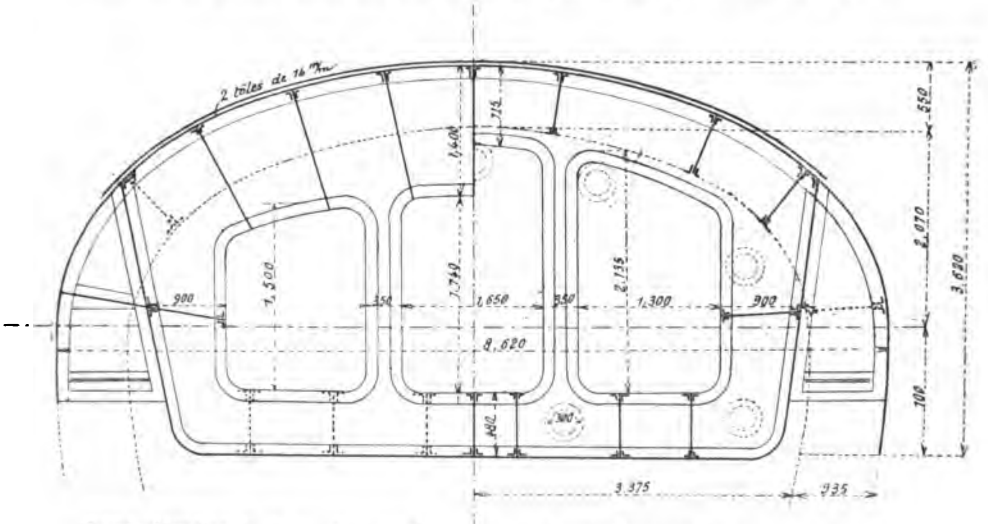
Enfin, la queue du bouclier était si courte qu'on n'y pouvait maçonner qu'un anneau à la fois : l'exécution du revêtement aurait retardé la marche au cas où les mineurs logés sous l'avant-bec déjà bien étroit auraient réalisé un avancement rapide.

IV. BOUCLIERS LAMARRE

SIXIÈME ET SEPTIÈME LOTS

Le bouclier du sixième lot et celui du septième étaient du même type dit Lamarre. Nous les décrirons d'abord pour n'avoir plus ensuite qu'à résumer la carrière de chacun ; la partie métallique sortait des ateliers de MM. Baudet, Donon et Cie ; M. Moranne jeune avait fait l'installation des presses et de toute la machinerie.

Bouclier. — Le bouclier (fig. 177 et 178) se composait essentiellement d'une tôle de 14 mm. d'épaisseur épousant la forme



Demi-élévation de la poutre avant. Demi-élévation de la poutre arrière.

Fig. 177. — Bouclier Lamarre. Coupe transversale.

d'extrados de la voûte à construire et descendant jusqu'à 1 m. en contre-bas des naissances ; cette tôle avait 6.00 m. de longueur ; elle était coupée normalement en arrière et taillée en visière en avant sur une longueur de plus d'un mètre ; sur sa partie centrale, dans la largeur correspondante aux poutres de soutien, elle était doublée d'une deuxième tôle de même épais-

seur soit 14 mm. ; 2 poutres maîtresses distantes de 2 m. d'axe en axe servaient à la raidir et à la porter.

La poutre arrière comprenait :

1° Une traverse horizontale inférieure de 48 mm. de hauteur placée à 1 m. au-dessous des naissances et formée d'une âme fixée par quatre cornières d'une part à une semelle de 150 mm. de largeur et d'autre part à une tôle continue reliant les deux poutres ;

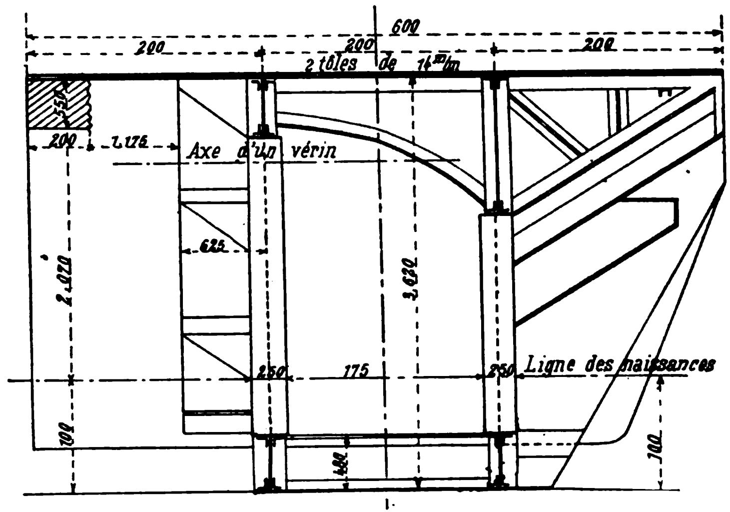


Fig. 178. — Coupe longitudinale du bouclier Lamarre.

2° De deux traverses extrêmes de 900 mm. de largeur au niveau des naissances ; la largeur de ces montants croissait de la base au sommet, par le fait de l'inclinaison de la semelle extérieure sur la verticale.

3° De deux traverses verticales intermédiaires de 715 mm. de largeur ;

4° D'une traverse supérieure placée directement sous l'enveloppe et reposant sur ces quatre montants.

La poutre d'arrière présentait ainsi 3 ouvertures ; celle du milieu avait 1,650 m. de largeur et de 2,425 m. de hauteur maxima ; les deux extrêmes avaient 1,300 m. de largeur et 2,135 m. de hauteur du côté de l'axe.

La poutre d'avant était formée de la même façon ; mais la hauteur de la traverse supérieure étant portée à 1,400 m., l'ouver-

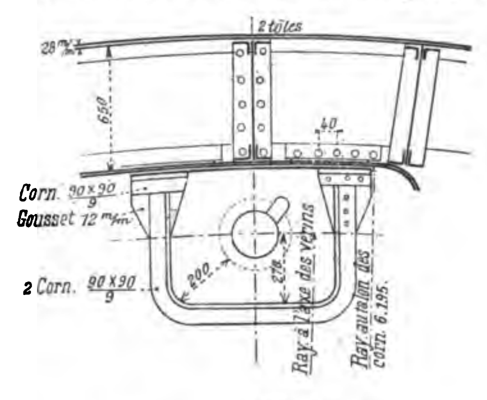
ture centrale n'avait plus que 1,740 m. de hauteur et les deux latérales 1,50 m.

Seize entretoises longitudinales, dont sept à la partie inférieure pour former l'armature du plancher, reliaient les deux poutres sur toute leur hauteur.

Comme ces deux poutres, pour permettre la construction des piédroits, n'occupaient pas la largeur entière de la section mais n'avaient guère que 6,750 m. de largeur à hauteur des naissances, la tôle restait en porte à faux sur 0,90 m. environ ; des consoles la soutenaient, raidies par des cornières.

Le bouclier était ainsi partagé en 3 parties de longueurs égales entre elles et égales à 2,00 m.; l'avant-bec était supporté par 11 consoles de 2 m. de longueur et de la hauteur de la poutre d'avant ; la queue restée libre sur 1,375 m. de longueur n'était appuyée qu'à son pied par 9 petites consoles de 625 mm. de longueur.

Les dimensions extrêmes de l'engin étaient : longueur 6 m. ; hauteur 3,624 m. sous la tôle, largeur 8,620 m. à l'intérieur de l'enveloppe.



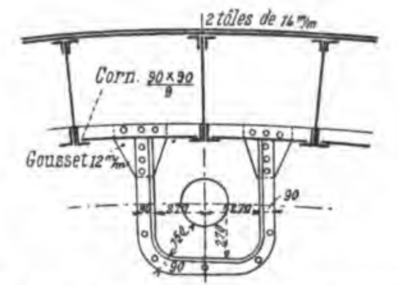


Fig. 179. — Détails des supports des vérins.

Vérins et machinerie. — Il y avait 9 vérins : 4 à hauteur du plancher inférieur, 5 sur le périmètre ; 6 étaient fixés sur la poutre avant et traversaient la poutre arrière ; les 3 autres étaient attachés à la poutre arrière par des étriers formés de cornières et de goussets (fig. 179).

Chaque piston avait un diamètre de 190 mm. et une course de 1,020 m. ; on le ramenait à sa position initiale par un vérin de rappel latéral.

Sous une pression d'eau maxima de 400 kg. par centimètre carré la puissance de chaque vérin était de 112 t., donnant pour tout l'appareil un effort de plus de 1 000 t.

Dans le bouclier du sixième lot la dynamo et les pompes étaient placées sur le plancher inférieur, dans la travée latérale de gauche, dans celui du septième lot, au contraire, elles occupaient le compartiment central.

Glissement. — Le bouclier glissait sur un plancher (fig. 180) formé de poutrelles transversales à la section ; entre sa base et ce plancher on interposait 3 ou 4 glissières longitudinales de 8 × 16 × 100 cm. recouvertes d'une bande de fer de 10 mm. d'épaisseur rivée sur le bois.

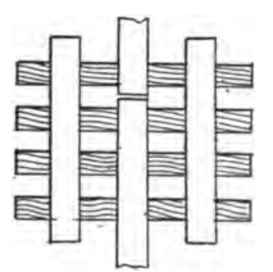


Fig. 180. — Plancher de glissement.

Appui. — L'appui des vérins s'effectuait sur des cintres en bois servant en même temps à supporter la voûte, comme la disposition de cette charpente était différente dans les deux lots, nous renvoyons sa description à l'étude de chaque bouclier.

BOUCLIER DU SIXIÈME LOT

Projet, profil en travers, tracé en plan. — Le bouclier du sixième lot devait descendre les Champs-Elysées et passer sous la place de la Concorde.

Dans cette partie, en partant du Rond-Point, le tracé présente successivement une pente de 0,95 mm. sur 420,79 m., une pente de 40 mm. sur 116,90 m., un palier de 55 m. et une rampe de 40 mm. sur 140,49 m. (fig. 181).

En plan à un alignement droit de 177,50 m. succèdent une courbe de 250 m. de rayon et 45,78 m. de longueur, puis un alignement droit de 143,04 m., une courbe de 200 m. de rayon sur 112,37 m., un alignement droit de 73,79 m., une courbe de 200 m. de rayon sur 48,29 m. et une dernière courbe de même sens de 350 m. de rayon sur 178,81 m.

Montage et essais. — Le montage s'effectua en décembre 1898 en face de la rue Boissy-d'Anglas, dans une chambre non boisée de 13 m. de longueur sur 9 m. de largeur ; il devait être terminé le 8 janvier sous peine de 200 fr. de retenue par jour de retard.

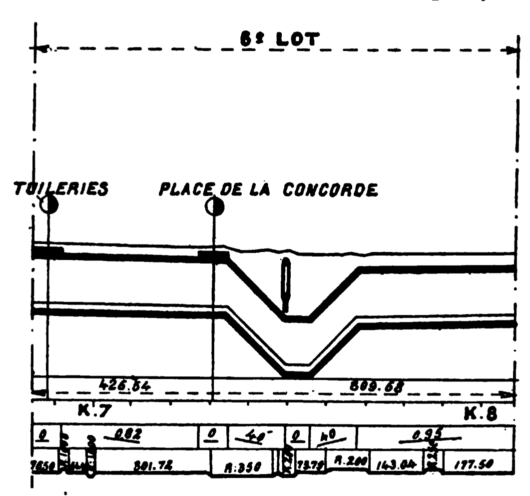


Fig. 181. — Profil en long du 6e lot.

En réalité il ne fut achevé qu'à la fin du mois ; les essais eurent lieu le 23 et le 24 janvier 1899, la mise en marche le 31, à 3 heures du soir et la deuxième course le 3 février : dans cet intervalle de trois jours on avait perfectionné l'installation et cherché à consolider le plancher d'appui établi sur le sol qui, trop compressible, s'affaissait sous la charge.

Charpente d'appui. — Les vérins prenaient appui sur les 20 cintres soutenant la calotte ; ces cintres en bois (fig. 182) étaient formés de 4 vaux taillés dans des madriers de 8 cm. d'épaisseur et assemblés par des éclisses en fer ; à la clef l'assemblage se faisait dans un poinçon vertical ; la hauteur des joues était de 45 cm. environ, la hauteur en clef de 30 cm. ; l'épaisseur de $3 \times 8 = 24$ cm.

On supportait chaque cintre par des calages et par deux pièces verticales de 20/20 cm. d'équarrissage distantes de 2,00 m. d'axe en axe et reposant sur des poutrelles transversales à l'axe du tracé.

Les différentes fermes espacées de 1,00 m. étaient entretoisées par 7 longerons de 25/25 cm. placés au droit des axes des vérins et

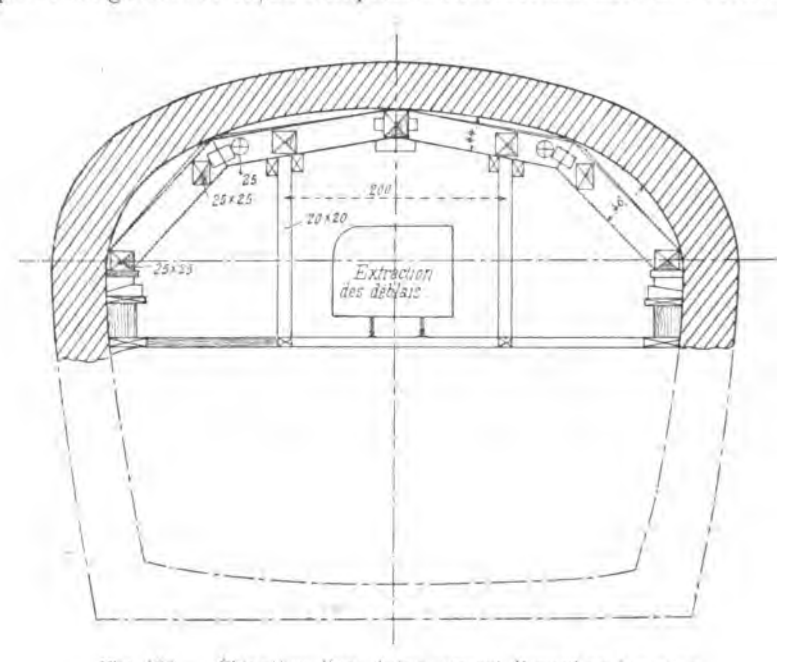


Fig. 182. — Élévation d'un cintre servant d'appui au bouclier.

par 2 bois ronds de 25 cm. de diamètre ; les chandelles verticales étaient en outre reliées au-dessous des vaux par des madriers en long.

Fonctionnement du bouclier. — Un plancher volant partageait en deux la chambre de travail ; on procédait à l'abatage du front suivant un plan incliné continu sur toute la hauteur, sans échelons.

Les déblais étaient chargés dans de grands wagons en bois cubant 1 m³ qui ne pouvaient passer que dans la travée centrale ; c'est pour cette raison que la dynamo et les pompes d'abord montées au milieu furent bientôt changées de place et installées à gauche : l'arrivée et la sortie des wagons s'effectuaient donc sur une voie unique au grand détriment de la célérité du service ; la travée de droite servait à la circulation des hommes ou à l'approche des matériaux de faible poids.

La traction était animale.

Au début on enlevait les déblais par une petite galerie reliant l'arrière du chantier à la galerie d'évacuation percée du Rond-Point des Champs-Elysées à la Seine ; plus tard, quand dans cette partie arrière le tunnel fut ouvert avec la section normale, le service fut beaucoup plus aisé et par suite plus rapide.

Il était rare qu'on pût réaliser en une seule fois l'avancement d'un mètre nécessaire à la pose d'un nouveau cintre. Les fermes se serraient, en effet, sous l'effort de compression auquel elles étaient soumises et la course utile des presses n'était guère que de 0,90 m. ; il fallait procéder à une deuxième opération, après interposition de calages.

Exécution du revêtement maçonné. — On ne pouvait exécuter sous la tôle de la queue qu'un anneau de maçonnerie ; les piédroits étaient construits au préalable dans le bouclier même sur 1 m. en contre-bas des naissances ; deux maçons seulement pouvaient travailler à la fois faute d'un espace libre suffisant ; aussi fallait-il de 8 à 10 heures pour avancer le revêtement de 1 m. ; quelquefois on employait à ce travail de si petits morceaux de meulière qu'on mettait 12 heures. Ceci limitait la progression générale à 2 m. par journée complète.

Les piédroits ne furent achevés que plus tard : en raison de la quantité d'eau rencontrée, on attendit que les épuisements fussent complets.

Equipes. — Au début de l'organisation du chantier il y avait dans le bouclier :

Un chef de poste, quatre mineurs, deux terrassiers ; plus tard, pour hâter l'avancement, on mit un chef de poste, quatre mineurs et dix terrassiers.

La maçonnerie occupait, nous l'avons dit, deux maçons et leurs aides.

Organisation générale, installation mécanique. — Etant donné que l'évacuation se faisait directement à la Seine par l'arrière, il n'y avait aucune installation mécanique. Le secteur électrique

de la rive droite fournissait l'énergie nécessaire à l'éclairage et à la marche des pompes.

Terrains rencontrés. — Le bouclier travailla presque constamment dans le sable fin et le gravier; en dessous de ces lits régnait une épaisse couche de marne blanche.

Dès le début, en février, on rencontra quelques lentilles de caillasse résistante; en mars on fut arrêté par les anciennes fortifications Louis XV; il fallut enlever des pierres de taille reposant sur un massif bétonné sur 9 m. de largeur à 2 m. de chaque côté de l'axe.

Plus tard, au milieu de mai, une masse de 3 m. × 4,50 m. de caillasse dure s'opposa par un serrage énergique à la marche en avant; on avait vainement cherché à la faire basculer en creusant une cavité par-dessous; la tôle fut légèrement faussée, mais on ne jugea pas utile de la réparer. La pression était montée à ce moment à 350 kg. par centimètre carré dépassant la limite supérieure du manomètre qui s'arrêtait à 225 kg.

Ces sables traversés étaient aquifères; pendant tout le cours du travail il fallut les assécher.

Epuisements. — On avait d'abord installé à l'arrière une pompe à piston, système Salsom de deux chevaux de force; débitant 3 900 lit. à l'heure; elle était mue par un moteur Alioth, de 34 chev. de force (250 ampères 100 volts), tournant avec une vitesse de 580 t. à la minute et branché sur le secteur.

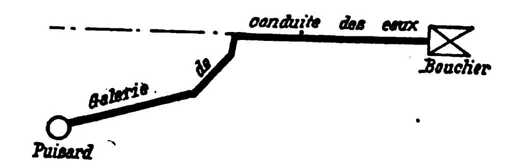


Fig. 183. — Tracé en plan de la galerie de conduite des eaux.

Puis on jugea nécessaire de percer une galerie qui, partant de la tête du bouclier (fig. 183), conduirait les eaux par la pente même de l'ouvrage, jusqu'à un puisard situé à l'entrée de la place de la Concorde. On commença cette galerie par les deux

extrémités à la fois. On partit du bouclier à la hauteur du plan de glissement, c'est-à-dire à 1 m. sous les naissances. La galerie boisée (fig. 184) avait 1,25 m. de largeur au sommet, 1,50 m. à la base et une hauteur de 1,85 m.; une goulotte inférieure de 50 × 75 cm. était creusée dans la marne et blindée avec des planches.

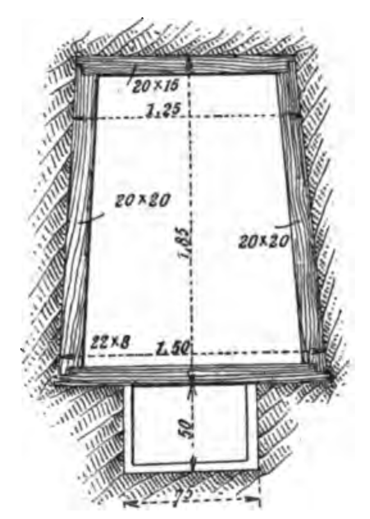


Fig. 184. — Galerie de conduite des eaux (coupe transversale).

Pendant l'exécution de ce travail il fallait assurer l'épuisement à la fois de la petite galerie et de la section ouverte par le bouclier.

Contre le dernier cadre monté (fig. 185), on plaçait la crépine d'une petite pompe de relai à bras installée de l'autre côté du bouclier à une distance variable; l'eau retirée du front d'attaque était ainsi envoyée 3 m. plus loin dans un puisard; on l'y reprenait par une grosse pompe centrifuge placée à 33 m. de là environ, débitant 16 000 lit. à l'heure et remplaçant la pompe Salsom primitive. Son moteur Alioth était installé à 10 m. en arrière en moyenne.

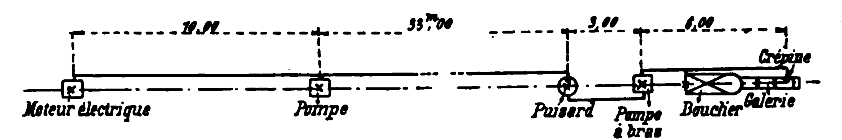


Fig. 185. — Dispositions pour l'épuisement pendant l'exécution de la galerie.

Les deux galeries se rejoignirent le 30 mai 1899 et rendirent désormais inutiles les épuisements sur le parcours.

Les eaux du puisard de la place de la Concorde étaient rejetées dans l'égout collecteur d'Asnières par trois pompes centrifuges Salsom; deux de ces pompes pouvaient débiter 3 000 lit. par minute; elles étaient actionnées par une dynamo; la troisième, plus petite, fonctionnait à l'air comprimé et servait de machine de secours. Des jaugeages faits en juin ont donné de 350 à 470 lit. par minute comme importance de l'afflux.

Vitesse. — Le bouclier fonctionna du 31 janvier au 30 juin 1899; il parcourut en tout 90 m., y compris la longueur de la chambre de montage. Sa vitesse moyenne générale ne fut donc que de 0,60 m. En février il ne progressa que de 4,05 m., soit 0,14 m. par jour, en mars de 14,88 m., soit 0,50 par jour, en avril de 30,02 m., soit 1 m. par jour en mai de 12 m. et en juin de 25 m.

Le reste du souterrain, 450 m. environ, fut construit sur bois.

Incidents et avaries. — Les cintres avaient primitivement été construits en bois blanc d'après cette idée qu'en les faisant légers le transport en serait plus aisé; ils furent rapidement écrasés; on les remplaça par d'autres en chêne. Encore ceux-ci furent-ils quelquefois disloqués et mis hors d'état de servir.

Dès que les vérins commençaient à agir sur eux, ils se serraient les uns contre les autres en comprimant les longerons et en glissant sous la maçonnerie malgré la charge; on releva fréquemment d'importants mouvements de cette nature; nous n'en citerons que deux exemples :

29 avril

1er cintre	recul	....	0,090 m.
2e	—	—	0,055 m.
3e	—	—	0,050 m.
4e	—	—	0,045 m.
5e	—	—	0,035 m.
6e	—	—	0,030 m.
7e	—	—	0,025 m.

1er mai

1er cintre	recul	40 mm.	revenu	10 mm.
2e	— —	30 —	—	10 —
3e	— —	25 —	—	5 —
4e	— —	15 —	—	2 —
5e	— —	10 —	—	0 —
6e	— —	7 —	—	0 —
7e	— —	5 —	—	0 —

Ceci suffit à montrer que les cintres ne revenaient pas à leur position première quand l'effort cessait de s'exercer.

C'était, il est vrai, un avantage pour la maçonnerie; le dernier anneau exécuté, encore frais, risquait moins d'être entraîné et décollé du précédent.

Le plus grave défaut de l'armature était la dislocation continue qu'elle causait dans le revêtement ; la queue frottant sur le dernier anneau le détachait de la masse et le fissurait : on laissait alors sous la tôle un vide de 10 cm. qu'on bourrait avec du sable ; les injections de ciment sous pression furent aussi employées, mais leur résultat était très incertain ; par une barbacane on introduisit une fois vingt-cinq sacs de ciment sans qu'on sût où l'injection allait se loger.

Quatorze anneaux trop maltraités, surtout sur les flancs, par le mouvement de lacet du bouclier et le défaut de blocage de la maçonnerie contre le terrain, durent être démolis, remis sur bois et reconstruits.

Pendant longtemps, on fut très souvent gêné et même arrêté par l'eau, les épuisements étant insuffisants ; en juin, par suite de la rupture d'un égout, le chantier fut inondé jusqu'à ce qu'on pût rejeter les eaux dans le collecteur prolongeant la rue de Rivoli près de l'hôtel de Coislin ; le bouclier sous la poussée du terrain se gauchit : il ne fut pas réparé ; le 30 juin d'ailleurs on le démonta en ne laissant que la tôle d'enveloppe dans la maçonnerie.

La machinerie entraîna aussi de fréquents arrêts : inversion de tuyauterie, rupture des vannes, de clapets, tout autant d'avaries dues probablement au manque de soins et d'habileté du conducteur de l'appareil.

Les pressions réalisées en cours de marche varièrent de 120 à 225 kg. par centimètre carré.

BOUCLIER DU SEPTIÈME LOT

Profil en long, tracé en plan. — Le bouclier du septième lot partit du Rond-Point des Champs-Elysées et se dirigea sur la station de la rue Marbeuf.

Sur cette distance, le profil en long (fig. 186) ne présente qu'une rampe continue de 4,82 mm. par mètre sur 373,08 m.

En plan, le tracé est constitué par un alignement droit de 115,40 m., une courbe de 500 m. de rayon et 35,67 m. de longueur, un alignement droit de 64,31 m., une courbe de 500 m. de

rayon et de 36 m. de longueur et enfin un alignement qui se poursuit bien au delà de la station sur 727,79 m.

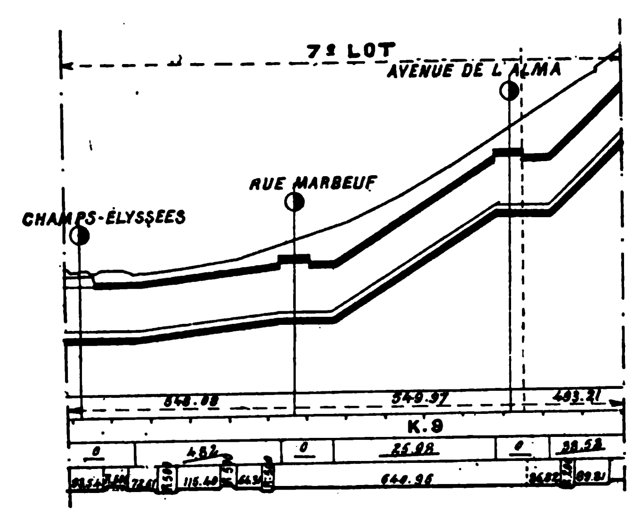


Fig. 186. — Profil en long du 7e lot.

Montage et essais. — Le bouclier fut monté au Rond-Point des Champs-Elysées (fig. 187) dans une chambre non boisée de

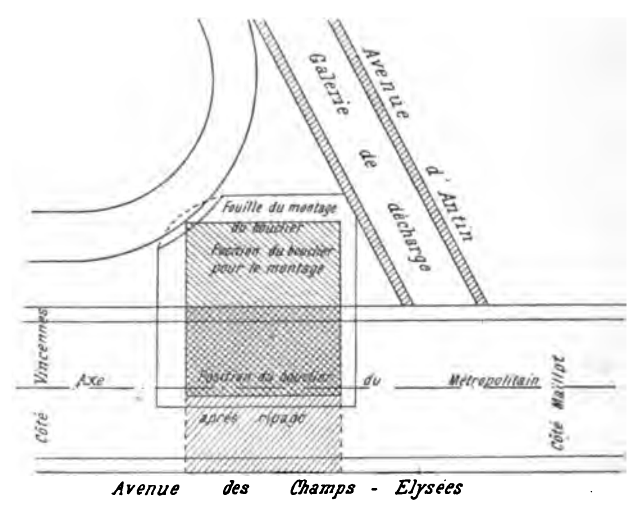


Fig. 187. — Montage du bouclier du 7e lot.

8 m. de largeur et 11,60 m. de longueur. Pour ne pas interrompre la circulation, cette chambre avait été creusée à 4 m. de

l'axe du tracé; après montage le bouclier fut ripé à sa place. Le travail était fait par l'équipe même du sixième lot; il fut donc peu rapide; commencé le 7 janvier 1899, il ne fut terminé que le 20 février.

Charpente d'appui. — Les vérins au nombre de neuf prenaient appui sur les vingt cintres qui supportaient la voûte. Chaque cintre (fig. 188) était formé de quatre vaux assemblés avec des

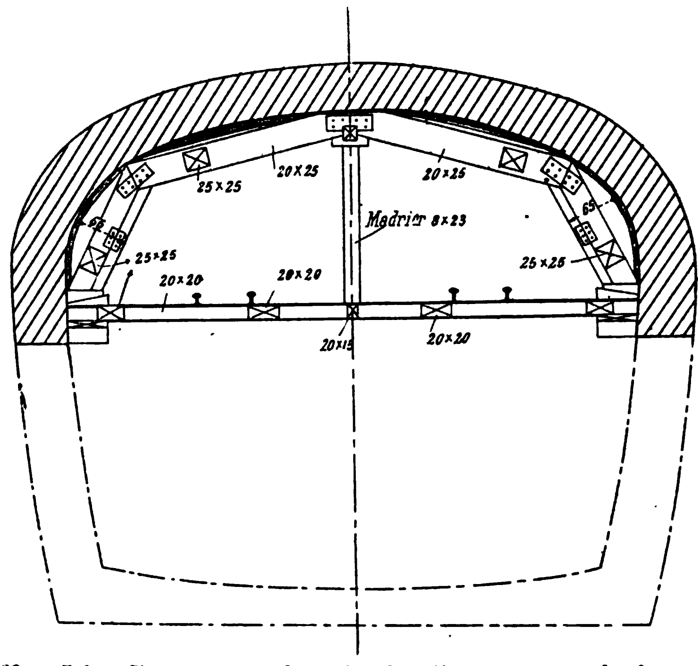


Fig. 188. — 7e lot. Cintres servant d'appui au bouclier (écartement des fermes 1 m.).

éclisses en fer; à la clef l'assemblage était fait dans un poinçon vertical; la hauteur des vaux sous les retombées était renforcée et portée à 0,65 m. pour éviter l'emploi de supports latéraux; les deux vaux supérieurs avaient 0,50 m. de hauteur; l'épaisseur était de 20 cm.; un madrier vertical de 8/23 cm. soutenait le poinçon et reposait sur une traverse horizontale qui portait en outre les calages; neuf longerons de 20/20 cm. d'équarrissage placés au droit des axes des vérins entretoisaient les fermes distantes de 1 m. d'axe en axe; un dixième longeron de 20/15 cm. réunissait les pieds des chandelles verticales.

Fonctionnement. — La dynamo et les pompes étaient installées dans le compartiment central du corps du bouclier ; deux voies de 0,60 m. placées dans les travées latérales servaient au transport des déblais ; les wagons du même modèle que ceux du sixième lot ne passaient que juste à l'intérieur des poutres maîtresses, il avait même fallu faire sauter quelques rivets dont la saillie était un obstacle ; l'approche des matériaux s'effectuait sur les deux voies pendant le chargement des déblais sur les wagons.

Les trains au départ du bouclier étaient entraînés par la gravité sur le plan incliné qui reliait le plancher au sol du souterrain ; ils étaient repris par des chevaux et conduits à la Seine par la galerie d'évacuation dont nous avons précédemment parlé.

La maçonnerie s'exécutait sous la tôle de la queue par anneau complet ; les piédroits étaient ensuite repris en sous-œuvre, en fouille blindée, par portions de 2 m. de longueur.

La longueur de 1 m. séparant deux cintres consécutifs devait être effectuée en deux fois en raison de la compression éprouvée par les longerons.

Equipes. — Il y avait six mineurs employés à l'abatage, quatre terrassiers au chargement, deux maçons, un de chaque côté, pour l'exécution du revêtement.

Installations mécaniques. — L'énergie nécessaire à l'éclairage et à la propulsion était empruntée au secteur électrique de la rive droite.

Vitesse. — Mise en marche le 20 février 1899 l'armature avait déjà parcouru 12,89 m. le 24 ; elle acheva sa carrière le 2 juillet ayant effectué le percement sur une longueur totale de 209,78 m. elle avait donc marché à la vitesse moyenne de 1,60 m. par jour.

La plus grande vitesse quotidienne fut de 2,50 m. et sa plus petite de 0,50 m. (fig. 189).

Arrivé dans la station de la rue Marbeuf le bouclier y fut démonté complètement dès le 5 juillet.

Terrains rencontrés. — Les terrains traversés (fig. 190) étaient en majeure partie composés de remblais ; sur quelques points on rencontra du sable argileux, mais jamais on n'eut à organiser des épuisements comme dans le lot précédent.

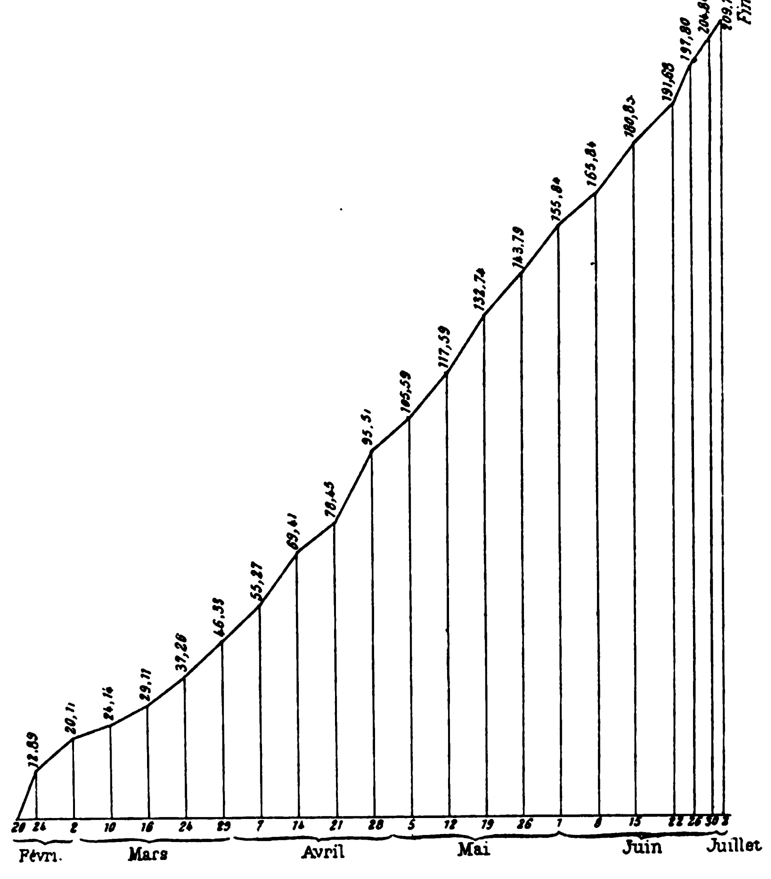


Fig. 189. — Graphique de marche du bouclier du 7e lot.

Pendant les quinze jours qui suivirent la mise en marche on fut considérablement retardé par de la vieille maçonnerie ; on ne pouvait employer la mine puisqu'on n'était pas à plus de 1 m. de la chaussée, il fallut opérer au pic.

En général on marcha avec une pression de 80 kg. par centimètre carré, soit un effort de 22,7 t. par vérin ou 203,5 t. pour l'ensemble.

Incidents et avaries. — Les cinq glissières d'appui entre le plancher du bouclier et les poutrelles transversales, rendaient très difficile la conduite de l'engin, en plan, par suite de l'inégalité des pressions latérales il ripait entièrement et cassait la maçonnerie fraîche ; en profil il avait un mouvement de galop qu'accentuait le mauvais état de la machinerie ; il y avait en effet tou-

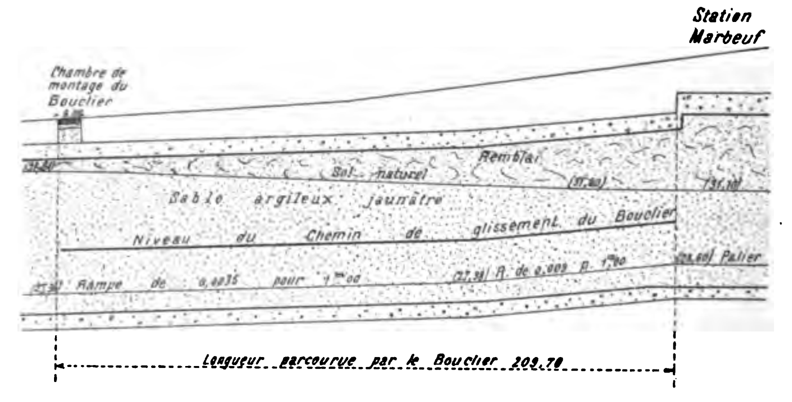


Fig. 190. — Coupe géologique des terrains rencontrés par le bouclier du 7e lot.

jours des fuites à l'arrière dans les presses ou la tuyauterie ; le terrain sans cesse détrempé tassait beaucoup plus facilement que s'il avait été sec.

Le revêtement en souffrit ; on n'avait d'ailleurs pas coupé les tôles à quelque distance au-dessus des naissances, pour bloquer les maçonneries contre le terrain ; trop peu soutenues elles s'ouvraient à la clef; on laissait bien entre elles et l'enveloppe dans la partie supérieure un vide de 4 cm. qu'on cherchait à bourrer pour éviter l'entraînement et la séparation en tranches ; mais le terrain ébranlé retombait sur l'extrados avant qu'on eut forcé le bourrage.

Conséquence inévitable : la chaussée se creusait en tombant dans les cloches qui résultaient du glissement des terres le long de l'armature.

Nous avons dit que le bouclier s'écartait fréquemment en plan de l'axe du tracé ; le maximum d'écart observé s'éleva presque à 30 cm.; 14 m. de maçonnerie sont à bûcher ou à démolir, de ce chef, pour retrouver le gabarit.

Enfin, comme dans le chantier précédent, les cintres reculaient sous l'effort des presses, à tel point que quelquefois les couchis tombèrent décintrant la voûte avant l'heure.

Conclusions. — En résumé le bouclier type Lamarre avait de graves défauts.

Il était un peu court ; la faible longueur de sa queue ne permettait de maçonner à son abri qu'un anneau de 1 m. ; avec 50 cm. de plus et une visière on aurait pu procéder par échelons et occuper plus de monde.

Il était très encombrant : les deux montants verticaux des poutres maîtresses partageaient la section en trois compartiments étroits où la circulation était difficile ; sous ce rapport, l'engin du septième lot était mieux utilisé que celui du sixième ; en plaçant la machinerie au centre on disposait de deux voies pour l'arrière des matériaux et l'enlèvement des déblais ; par contre, quand les wagons étaient en chargement il était impossible de sortir de la chambre de travail ou d'y entrer.

Les deux armatures offraient l'inconvénient d'assurer par la même voie l'approche et l'évacuation.

Le mode d'appui des vérins était détestable ; trop léger, pas assez chargé par la voûte, il cédait constamment ; outre un entretien coûteux, ceci avait pour conséquence : 1° l'obligation de faire chaque course en deux fois ; 2° l'impossibilité de guider convenablement le bouclier ; 3° la malfaçon des maçonneries soit qu'elles fussent décintrées trop tôt, soit qu'elles fussent arrachées par la queue dans les mouvements de lacet et de galop.

Enfin l'emploi d'un plancher et l'usage de glissières se prêtaient peu au maintien du bouclier sur l'axe du tracé.

CHAPITRE VI

LIGNE D'ISSY A VIROFLAY

(COMPAGNIE DES CHEMINS DE FER DE L'OUEST)

SOUTERRAIN DE MEUDON

BOUCLIER FOUGEROLLE

Le souterrain de Meudon d'une longueur de 3 360 m. a été attaqué par les deux extrémités à la fois; du côté d'Issy par les anciennes méthodes de percement sur bois ; du côté de Versailles avec une armature métallique.

Nous ne parlerons ici que du second de ces chantiers, celui de Viroflay.

Profil en long. Tracé en plan. — Le profil en long du tracé (fig. 190) présente de Viroflay à Meudon une pente continue de 8 mm. par mètre; sur toute l'étendue du lot il est en alignement droit.

Section transversale. — La section libre du tunnel a 9 m. de largeur entre les piédroits, 7,30 m. de hauteur entre le radier et la clef, 6,50 m. entre le rail et la clef. L'intrados est une courbe à trois centres ayant pour rayons des longueurs de 3,70 m., 4,80 m. et 3,70 m.; les normales aux deux points de raccordement font entre elles un angle de 93°,19'. Les piédroits sont verticaux sur 1,775 m. de hauteur et se raccordent au radier par un arc de cercle de 1,200 m. de rayon. Le radier est concave suivant une courbe de 20,50 m. de rayon.

L'épaisseur à la clef est la même qu'aux naissances, elle était prévue de 0,80 m. ; nous verrons plus tard qu'après 128 m. de parcours on porta cette épaisseur à 1,15 m.

Nature du revêtement. — La calotte et les parements des piédroits devaient être exécutés en moellons de béton moulé ; le radier et le corps des piédroits en béton coulé sur place au dosage de 350 kg. de ciment par mètre cube de sable.

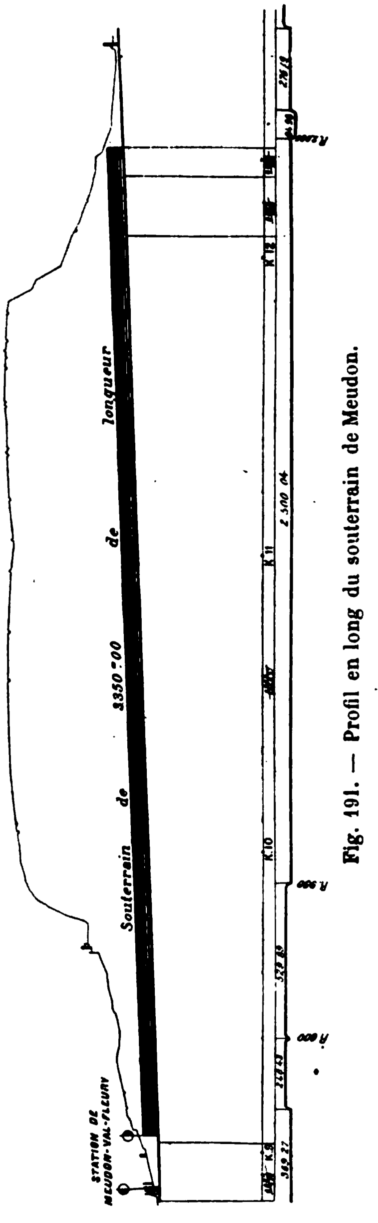


Fig. 191. — Profil en long du souterrain de Meudon.

Adjudication. — L'adjudication a eu lieu sur le vu de mémoires et de projets d'installation des chantiers dressés et présentés par les entrepreneurs ; le quatrième lot comprenant la partie de souterrain qui nous occupe fut adjugé le 2 septembre 1897, à MM. Fougerolle frères, moyennant un rabais de 20 p. 100 sur le prix du mètre courant de souterrain et de 16 p. 100 sur les autres travaux.

Ce prix du mètre courant était de 1 500 fr. comprenant déblais, maçonneries, blindages, épuisements, ventilation, éclairage et transport des déblais jusqu'à la tête de l'ouvrage.

Bouclier métallique. — Le percement devait s'effectuer à l'abri d'une armature métallique prenant appui sur le revêtement même exécuté en moellons artificiels.

L'appareil (fig. 193 et 194) se composait essentiellement de trois arcs supportant deux tôles de 15 mm. d'épaisseur ; celles-ci épousaient la forme de l'extrados sur 8 m. de longueur et des-

cendaient jusqu'à 1,05 m. au-dessus du niveau des naissances.

La hauteur des arcs ou poutres maîtresses était de 0,820 m. uniformément, leur espacement de 0,90 m. d'axe en axe ; l'armature était ainsi partagée en trois parties principales ayant pour

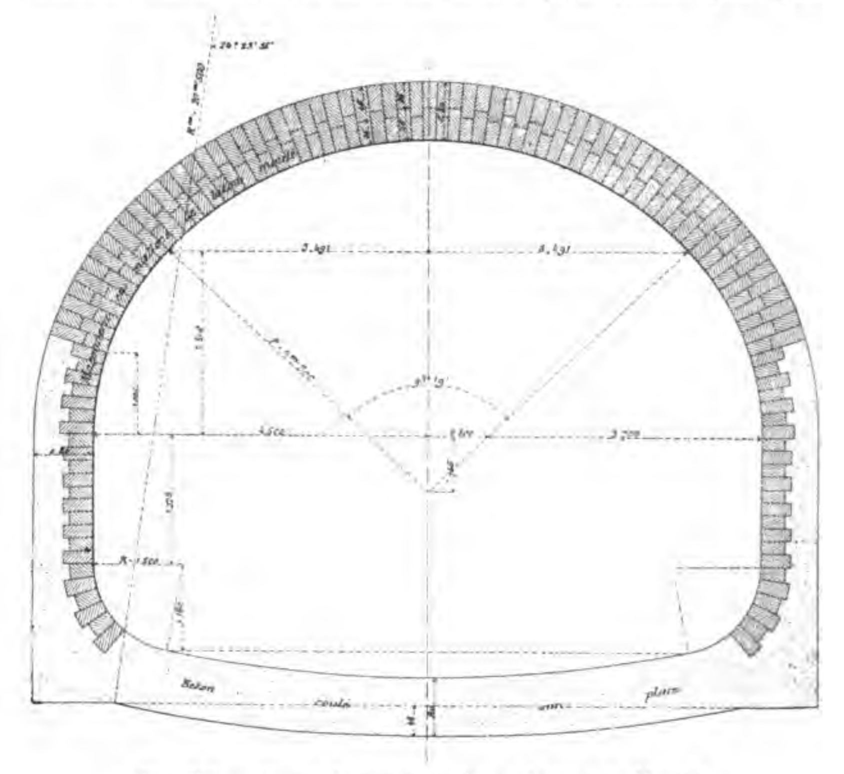


Fig. 192. — Coupe transversale du souterrain de Meudon.

longueurs : l'avant-bec 2,55 m., le corps 1,80 m. et l'arrière-bec 3,65 m., soit en tout 8 m.

Dans l'avant-bec la tôle d'enveloppe était taillée en visière sur 1,75 m. de longueur ; l'arrière au contraire était limité par une section droite.

Le corps était formé par six voussoirs métalliques assemblés par des boulons de 25 mm. de diamètre espacés de 12 mm. d'axe en axe, des entretoises intermédiaires servaient à attacher les vérins et à donner de la rigidité.

Les parties en porte à faux étaient soutenues par des consoles

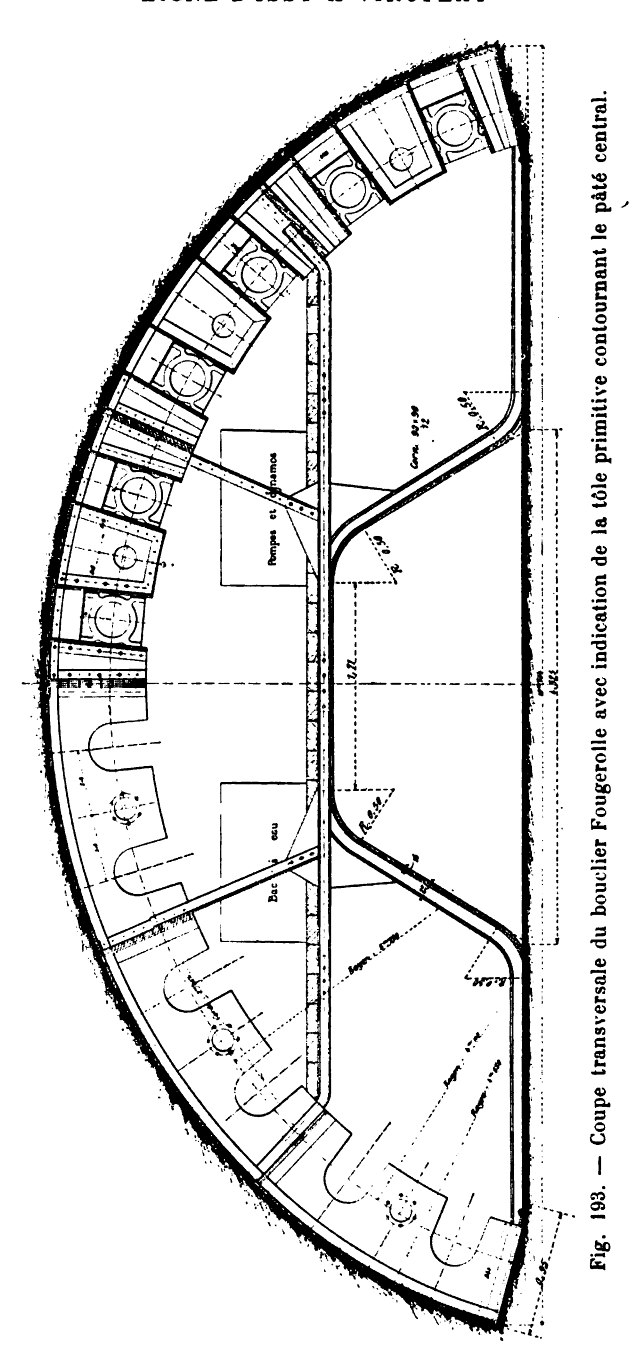


Fig. 193. — Coupe transversale du bouclier Fougerolle avec indication de la tôle primitive contournant le pâté central.

prolongeant les poutres longitudinales sur 2,280 m. à l'avant et

2,530 m. seulement à l'arrière ; la tôle d'arrière restait donc libre sur 1,120 m., c'est à son abri qu'on construisait le revêtement.

Tel qu'il fut monté (en juillet 1898), le bouclier affectait la

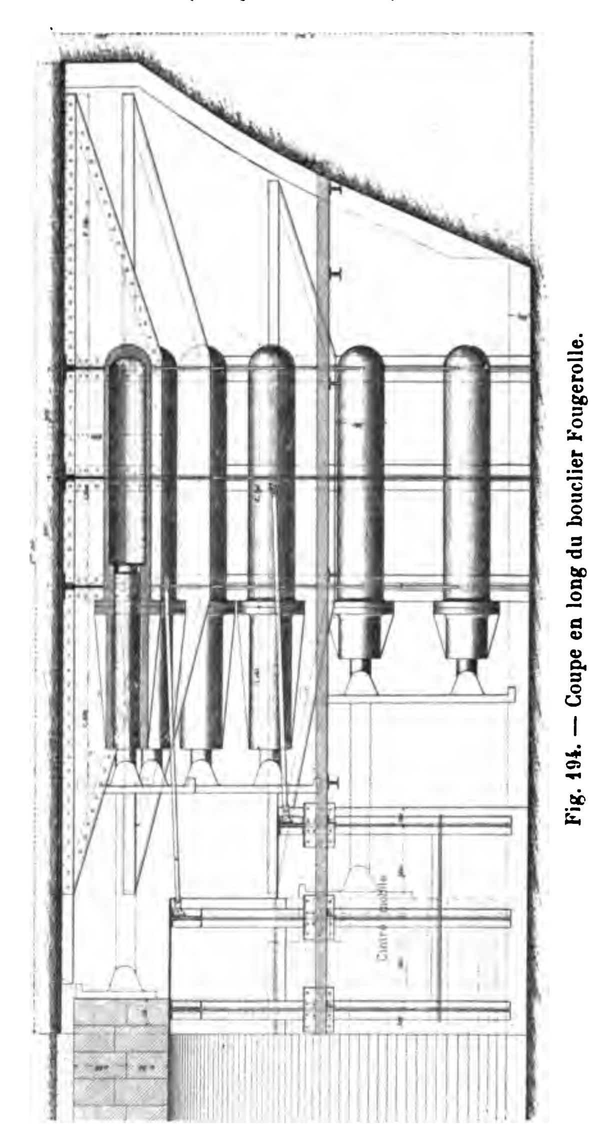


Fig. 194. — Coupe en long du bouclier Fougerolle.

forme représentée par la figure 194 ; il reposait sur le sol par une tôle contournée de façon à laisser un vaste pâté central qu'on n'enlevait qu'après coup ; le plancher était placé immédia-

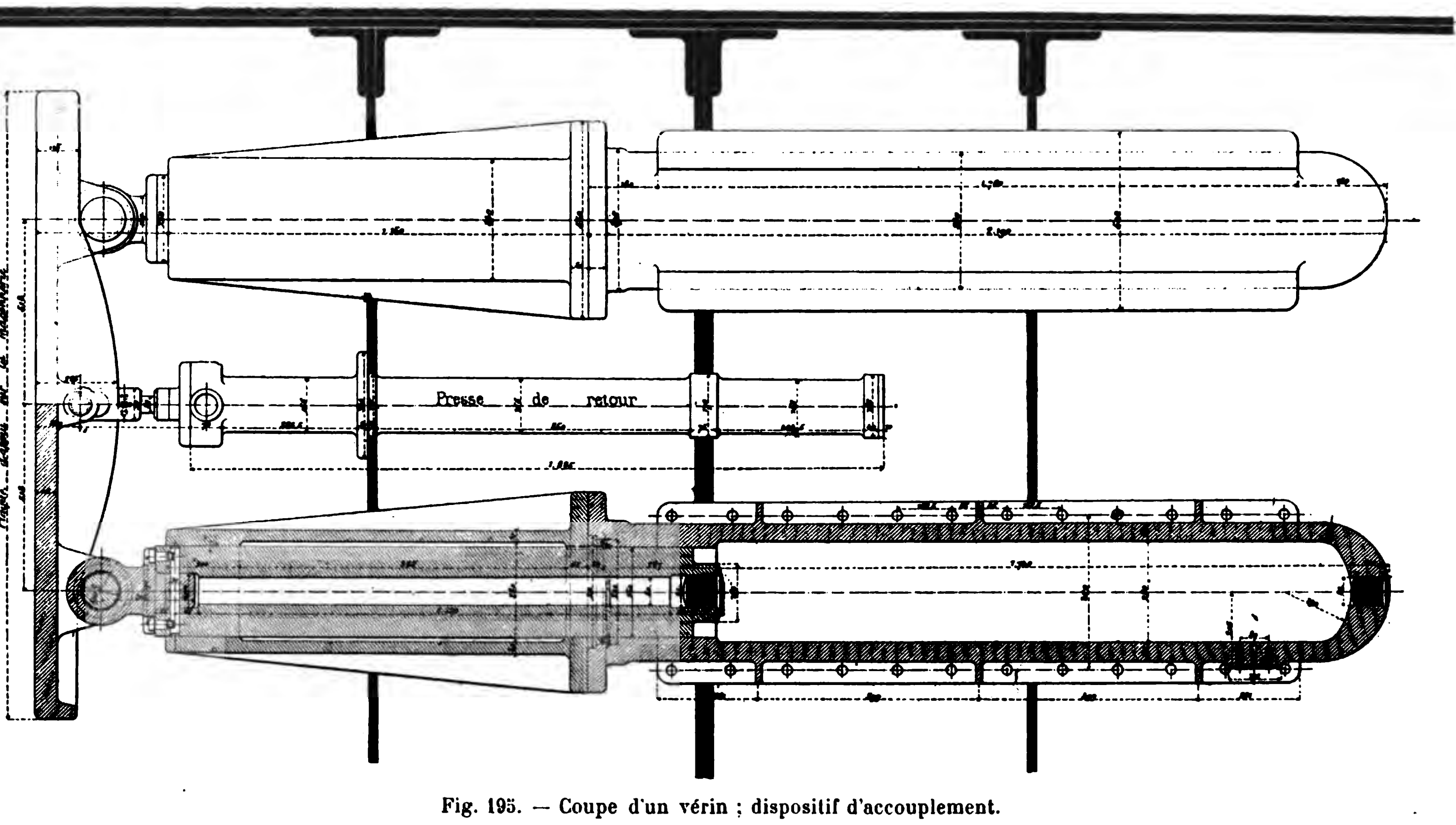


Fig. 195. — Coupe d'un vérin ; dispositif d'accouplement.

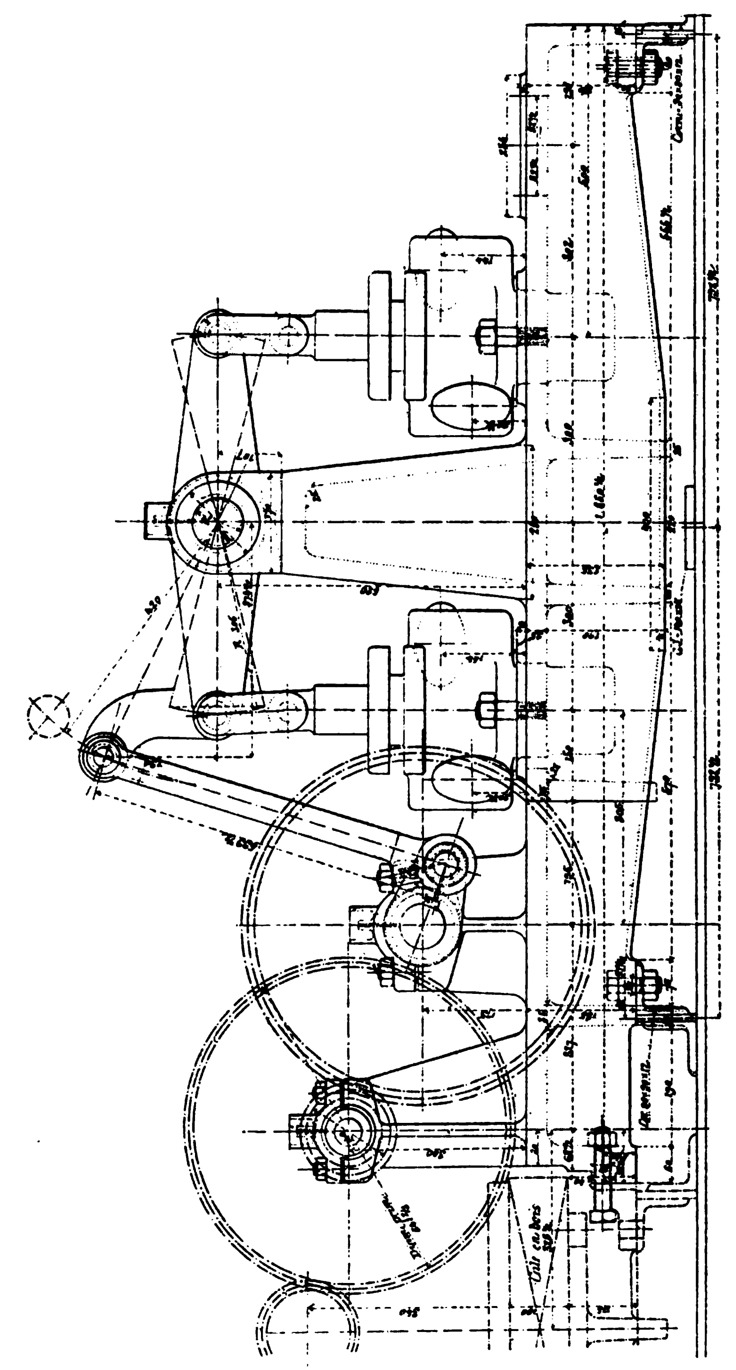


Fig. 196. — Élévation des pompes de compression.

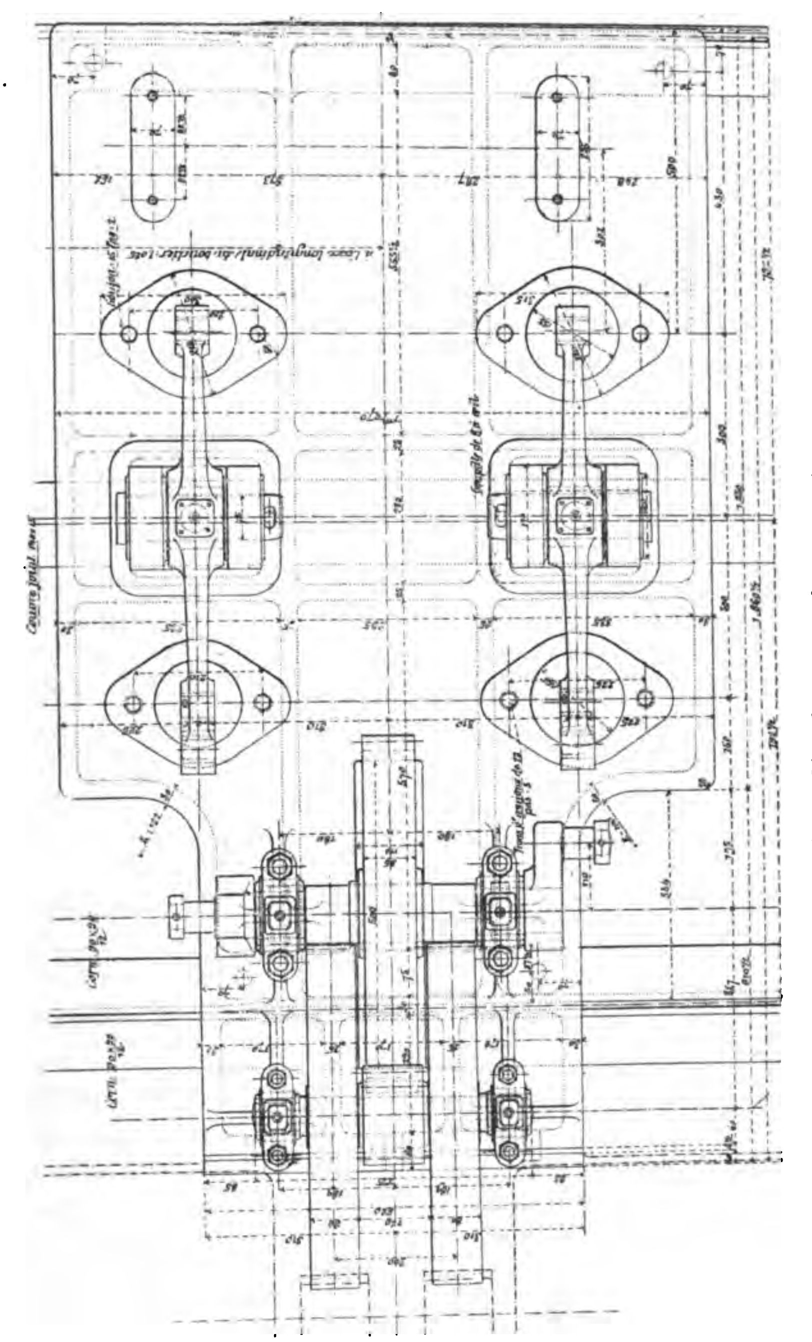


Fig. 196 *bis*. — Plan des pompes de compression.

tement au-dessus de cette tôle; le dessous de la poutre d'appui se trouvait ainsi à 1,65 m. du sol; la hauteur libre sous clef n'était que de 2,20 m.

Vers le 10 octobre on reconnut que cette disposition était fort gênante et ne se prêtait pas à une évacuation rapide des déblais; on démonta la tôle centrale, ce qui augmenta la section libre de toute la partie inférieure, haute de 1,60 m. ; le plancher resta à sa place, mais on le supporta par des fers en U fixés aux poutres maîtresses.

Les dimensions extrêmes de l'engin étaient : longueur 8 m.; hauteur 3,995 m.; largeur 10,554 m.

Vérins et machinerie. — Les vérins étaient au nombre de douze espacés d'axe en axe de 1,03 m.; la gaine, de chacun, en acier, avait une longueur de 3,340 m. un diamètre extérieur de 38 cm. et une épaisseur de parois de 5 cm.; le piston plongeur, en fonte, avait un diamètre de 0,25 m. et une course de 1,50 m.

Les vérins étaient accouplés deux à deux (fig. 195) et réunis par des articulations à des plaques destinées à la prise d'appui directe sur le revêtement; le retour en arrière de la plaque et des presses s'effectuait au moyen d'un petit vérin de rappel ayant 1,885 m. de longueur, 0,156 de diamètre extérieur, 0,100 de diamètre intérieur.

Les pompes de compression (fig. 196) et la dynamo motrice étaient placées à droite sur le plancher intermédiaire; le bac à eau leur faisait pendant, à gauche.

La pression effectivement réalisée au cours du travail a varié entre 50 et 350 kg. par centimètre carré; soit un effort de 31,25 t. à 218 t. par vérin; l'ensemble des douze vérins aurait ainsi développé de 375 à 2 620 t., mais très souvent on n'utilisait que huit des vérins soit qu'on voulut ramener le bouclier dans une nouvelle direction, soit que les pistons ou les fourreaux des autres presses fussent hors de service.

Avec une pression moyenne de 100 kg. par cm², l'effort total était de 393 t. avec 8 vérins, de 589 t. avec les 12.

La surface frottante totale s'élevait à 100 m², dont 4,00 m² sur

les appuis ; l'effort moyen de frottement était donc, dans ces deux cas, de 4 ou 6 kg. par cm².

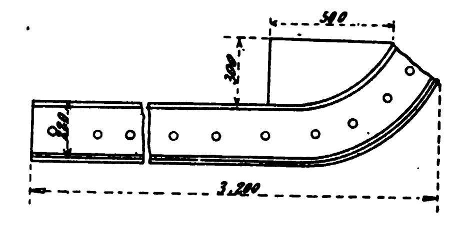
Poids du bouclier. — Le poids de l'engin ne peut être qu'approximativement indiqué ; il changea trop fréquemment par suite des modifications ou des additions apportées au cours du travail.

L'armature pesait environ 100 t. ; les vérins et la machinerie, dynamos et pompes, pesaient à peu près 20 t.

Appui du bouclier. — Au début l'armature glissait directement sur le sol ; une plaque d'acier de 2 cm. d'épaisseur et 5,20 m. de longueur répartissait la pression sur toute la largeur de la section ; elle se déforma rapidement et se voila dans tous les sens ; si bien qu'à force de la couper à l'avant et à l'arrière on réduisit sa longueur utile à 2,50 m.

Après le 19 juin on exécuta les piédroits à l'avance pour leur faire supporter l'engin ; pour faciliter le glissement en rendant plane la surface d'appui, qui, après un parcours de 128 m., s'était déformée considérablement (voy. fig. 207 et 208), on fixa sous l'armature une deuxième plaque en acier et on pilonna fortement du béton entre les deux plaques.

Le 3 juillet on interposa entre l'engin et chaque piédroit deux madriers ferrés ; ces madriers avaient 0,22 × 0,15 × 7 m. ; ils étaient recouverts d'une bande de fer de $\frac{0,12}{0,01}$ fixée par des boulons de 50 en 50 cm.



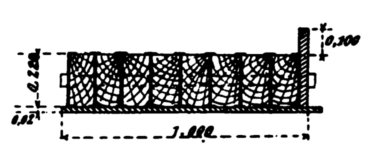


Fig. 197. — Traîneau. Élévation et coupe transversale.

Vers le 15 août la surface d'appui s'étant de nouveau déformée, on disposa sous l'armature des sortes de traîneaux. Ces traîneaux (fig. 197), de 3,20 m. de longueur totale et 1,00 m. de largeur, se composaient de 9 fers en double T, de 0,22 m.,

assemblés entre eux ; 8 pièces de chêne remplissaient les intervalles; une plaque d'acier de 15 mm. d'épaisseur était rivée aux fers en double T et servait au glissement; à l'avant les traîneaux se relevaient en forme d'éperon pour faciliter l'entraînement du système.

Appui des vérins, cintres pour la maçonnerie. — Nous avons dit que les presses étaient conjuguées deux à deux sur des plaques en fonte de 1,70 m. de longueur, qui, au moment de la progression, portaient directement sur le revêtement; celui-ci était établi avec des voussoirs en béton moulé. non pas sur des cintres fixes, mais sur une armature reliée à l'engin et mobile avec lui; cette armature était constituée par une tôle raidie par trois poutres circulaires distantes (fig. 198) de 0,75 m. d'axe en axe et composées d'une âme de 240 mm., et de quatre cornières de 70 mm. La tôle de la queue était disposée pour qu'on put construire la voûte sur la demi-montée, sur 0,75 m. de longueur, soit une course, et la claver complètement sur les 75 cm. précédents ; comme conséquence de cette disposition du revêtement en échelons, les tiges des vérins du bas avaient 0,75 m. de moins que celles des vérins du haut, mais la longueur de course restait la même.

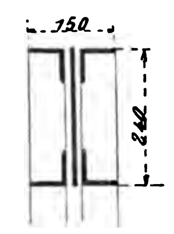


Fig. 198. — Coupe d'une poutre du cintre mobile.

Quatre vérins à vis reposant sur la tôle de fond du bouclier servaient d'appui au cintre mobile et permettaient d'effectuer son réglage.

Montage et essais. — Le bouclier fut construit au piquet 117 + 86 à 480 m. de l'origine du souterrain; la chambre du montage fut commencée le 14 avril 1898 et terminée le 1er mai; sa largeur était de 12,50 m. pour laisser un espace libre de 0,90 m. autour de l'enveloppe et permettre l'assemblage et le rivetage des pièces; les cadres d'appui des boisages n'étaient distants que de 1 m. d'axe en axe, il fallut pourtant les doubler pour éviter leur rupture sous l'effort de poussée des terres; une voûte en béton de 0,70 m. d'épaisseur recouvrait la chambre;

elle fut exécutée du 2 au 12 mai. Un orage survenu le 24 mai retarda les travaux, le souterrain ayant été envahi par les eaux.

Le 4 juin on commença l'approvisionnement à pied d'œuvre des voussoirs métalliques, et le 6 juin le montage proprement dit; le 27 juillet eut lieu la première course qui s'effectua sans incidents; un anneau de 2,00 m. de longueur avait été maçonné à l'arrière pour l'appui des vérins; on jugea cette longueur insuffisante et on l'augmenta de 6,00 m.; si bien qu'après la première course le bouclier avait derrière lui 8,80 m. de revêtement.

Fonctionnement. — Primitivement le déblai d'une course se faisait par huit mineurs, deux de chaque côté du pâté central et quatre à la partie supérieure; huit manœuvres leur étaient adjoints pour l'évacuation des déblais. Deux voies latérales, placées entre le pâté et la tôle de l'armature, amenaient les wagonnets Decauville jusque sur le front d'attaque; les terres y étaient jetées soit directement, soit par des trappes ménagées dans le plancher horizontal établi à mi-hauteur de la section.

Après l'enlèvement de la tôle centrale, l'agencement des voies d'évacuation fut modifié : on relia les deux voies latérales par une transversale perpendiculaire à l'axe et par deux plaques tournantes (fig. 199).

Les wagons vides arrivaient par la gauche, étaient chargés sur le front et sortaient pleins par la droite.

Dans ces deux organisations, les déblais étaient conduits à l'arrière jusqu'à une cunette centrale dont l'avancement était réglé sur celui de l'engin; la cunette avait une hauteur de 3,00 m. et des largeurs de 3,50 m. en couronne et de 2,50 m. au fond; elle était couverte à sa partie antérieure par une estacade ou plancher en bois supportant les voies Decauville sur lesquelles roulaient les wagonnets des services de l'avancement et de l'approvisionnement; au fond de la cunette circulaient de grands wagonnets sur voie de 1 m.; les déblais étaient directement déversés des petits wagons supérieurs dans les grands wagons inférieurs par renversement.

Les matériaux amenés par la voie principale étaient montés

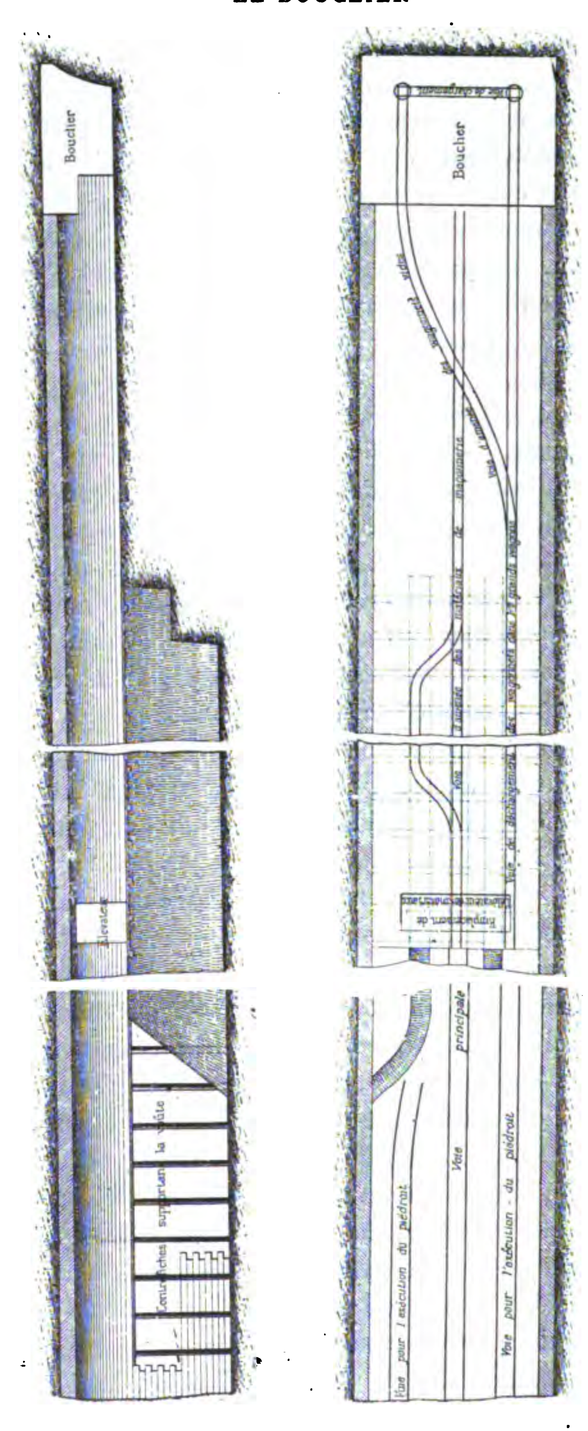


Fig. 199. — Disposition générale du chantier ; coupe longitudinale et plan.

sur l'estacade au moyen d'une grue électrique et conduits à pied d'œuvre par une voie axiale arrivant jusqu'au bouclier.

La voûte était construite comme nous le dirons tout à l'heure; on reprenait les piédroits en sous-œuvre par parties alternées de 4,00 m. de longueur. Dans certaines parties, pour éviter les tassements, on a implanté provisoirement la maçonnerie des piédroits sur le banc de gypse situé au-dessus du radier; la partie qui reste à faire sera achevée plus tard. Le terrassement des piédroits s'exécutait ainsi : on élargissait la cunette jusqu'à l'intrados de la calotte, on supportait le revêtement par des contrefiches et on procédait à l'abatage proprement dit du piédroit, qu'on maçonnait aussitôt; il n'y eut de difficultés que

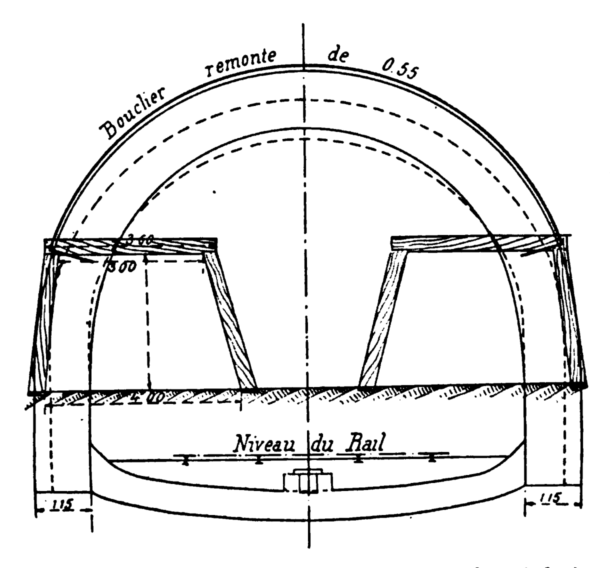


Fig. 200. — Galeries latérales pour l'exécution des piédroits.

lors de la rencontre de sources : les boisages indispensables pour la sécurité gênaient fort les ouvriers.

Quand on exécuta les piédroits à l'avance (fig. 200), on utilisa les galeries latérales pour l'enlèvement des déblais [1]; les terres y étaient dirigées directement dans de grands wagons par des

[1] Ces galeries avaient 4 mètres de largeur au pied, 3 mètres en tête et 2 m. 80 de hauteur, toutes ces dimensions étant comptées entre boisages.

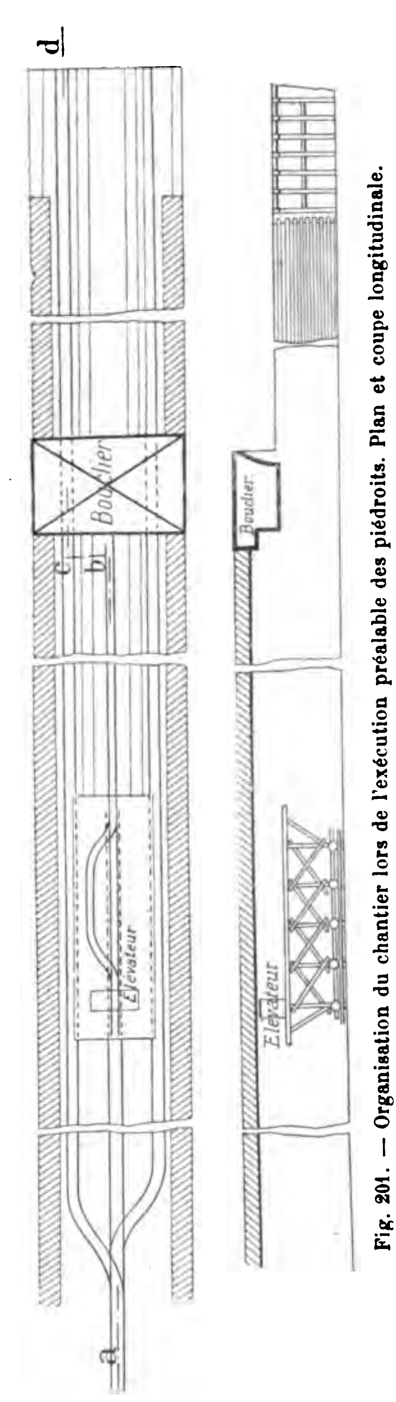


Fig. 201. — Organisation du chantier lors de l'exécution préalable des piédroits. Plan et coupe longitudinale.

ouvertures ménagées dans le plancher du bouclier et le plafond blindé des galeries (fig. 201).

L'apport et le montage des matériaux s'effectuaient à bras d'hommes. Le mortier était fabriqué à une vingtaine de mètres en arrière des cintres dans l'espace resté libre entre les voies des galeries.

Le déblai au front d'attaque s'est toujours fait sur une longueur minimum de 0,80 m., dont le pourtour était taillé le plus régulièrement possible ; si la mauvaise tenue du terrain l'exigeait, on plaçait comme protection quelques planches de blindage; dans les marnes on forait avec des tarrières des trous de mines de 0,80 m. à 1,00 m. de profondeur, qu'on bourrait avec deux ou trois cartouches.

L'excavation achevée, on faisait fonctionner les vérins; l'avancement du bouclier était de 0,75 m., mais comme la course effective des vérins était de 1,50 m. on ramenait par les presses de retour les plaques d'appui à 1,50 m. de l'amorce du revêtement, soit à 0,75 m. du bord du cintre mobile pour permettre le travail des maçons.

La section de l'anneau était divisée en six parties permettant d'assurer une prompte exécu-

tion; chaque maçon travaillait isolément à sa portion de voûte, séparée de la voisine par un blindage provisoire; au moment du clavage on enlevait les blindages.

Le vide entre la maçonnerie et la tôle d'enveloppe fut bourré au début avec du gravier ou de la meulière, plus tard avec de la marne.

Personnel et équipes. — En moyenne le personnel comprenait :

Un chef de poste et huit mineurs employés à l'abatage au front d'attaque;

Huit manœuvres pour le chargement et le transport des déblais;

Deux manœuvres pour le régalage des terres dans les grands wagons;

Deux électriciens pour la mise en marche de l'armature;

Un chef maçon, six maçons pour l'exécution du revêtement;

Dix manœuvres pour l'approche des matériaux et la confection du mortier.

Organisation générale, installations mécaniques. — A l'intérieur du souterrain la traction était faite par des machines électriques à trolley aérien; la prise de courant s'effectuait par un petit chariot roulant sur deux fils conducteurs par quatre galets de bronze.

Deux tracteurs électriques étaient affectés au transport des terres et aux apports de matériaux.

Deux locomotives à feu prenaient les trains à la sortie et les conduisaient à la décharge située à 800 m. environ de la tête du tunnel.

A 200 m. de cette tête était installée une usine génératrice d'énergie; elle comprenait trois machines demi-fixes, à retour de flamme, d'une force de 45, 50 et 60 chevaux, actionnant chacune une dynamo de 50 chevaux de la Société Alsacienne (Type E-A, 23), à inducteur compound et induit en tambour; deux machines seulement étaient en service continu, la troisième servait de secours; la force moyenne produite était donc de 100 chevaux.

De l'usine, l'énergie était distribuée jusqu'à l'avancement des galeries sous une tension de 440 volts par quatre fils conduc-

teurs : deux pour les tracteurs, deux pour le bouclier, les pompes et la lumière.

Les pompes d'épuisement étaient au nombre de trois, commandées par trois dynamos de 7 chevaux chacune. Ces dynamos étaient également de la Société Alsacienne (Type G-70, excitation en série, induit en tambour).

Le ventilateur à aillettes courbes de 0,28 × 0,12 m. faisait 1 180 tours à la minute; il était mû par une dynamo de 10 chevaux du même système que les précédentes (Type G-80).

La dynamo de l'élévateur avait une force de 7 chevaux (Type G-70) ; celle du bouclier de 10 chevaux (Type G-80).

L'éclairage était fait par des lampes de 16 bougies, montées par 5 en séries.

Au total, la dépense d'énergie était ainsi répartie :

Epuisement	6	chevaux	environ.
Ventilateur	10	—	—
Eclairage	4	—	—
Elévateurs	7	—	—
Bouclier	10	—	—
Tracteurs	65	—	—
Total	102	chevaux	environ.

Terrains rencontrés, épuisements. — L'épaisseur du terrain sur la clef est d'environ 3,00 m. à l'embouchure; elle augmente graduellement jusqu'à la crête du coteau piquet 117 (566 m. de la tête), où elle atteint 73,00 m., puis elle conserve cette valeur moyenne jusqu'à l'extrémité du lot.

Les couches traversées sont : à la base, des marnes jaunâtres; au milieu, du gypse, dans la hauteur de la calotte, des marnes bleues feuilletées divisées par quelques lits de marnes vertes.

A son départ, le bouclier reposait complètement sur le dessus du banc de gypse, le travail d'abatage s'effectuait dans les marnes bleues; puis, le banc de gypse s'enfonçant rapidement, le bouclier porta sur la marne; celle-ci se gonfla par l'exposition à l'air et à l'humidité, les couches bleues glissèrent d'ailleurs sur les bancs verts; des tassements sérieux en résultèrent pour la voûte; en certains points les bancs supérieurs s'avancèrent de 0,25 m. à 0,35 m. sur

l'aplomb de la cuvette. Nous reviendrons plus loin sur leurs conséquences au point de vue du revêtement.

Dans la galerie inférieure d'avancement l'eau n'a été rencontrée qu'à 490 m. environ de la tête (piq. 117, + 90) ; le débit journalier était alors de 15 m³ ; ce n'est que plus tard, quand le bouclier eut parcouru une vingtaine de mètres, que les infiltrations devinrent plus abondantes ; au fur et à mesure de l'avancement elles ont crû, atteignant, en octobre 1899, 150 m³ par 24 heures. Toutes ces eaux étaient dirigées dans un puisard central établi au piquet 117 (560 m. de l'embouchure), puis refoulées à 13 m. de hauteur dans le ruisseau d'Ursine, distant de 150 m. de la tête, par une pompe centrifuge système Dumont ayant 0,08 m. de diamètre.

Dans la partie faite sur bois en arrière du bouclier, des suintements et des infiltrations s'étaient également produits, notamment aux abords du piquet 121 (160 m. de l'embouchure) où d'importants tassements disloquèrent la voûte ; le débit ne s'élevait qu'à 10 m³ par 24 heures; une pompe Dumont de 0,06 m. de diamètre, actionnée par une dynamo de 7 chev., rejetait ces eaux dans le ruisseau d'Ursine.

Deux autres pompes centrifuges et deux pompes à bras réunissaient au puisard du piquet 117 toutes les eaux filtrant au travers du revêtement et des galeries latérales d'avancement.

Vitesse. — Mise en marche le 27 juillet 1898 l'armature a fonctionné avec de longs arrêts jusqu'au 21 octobre 1899 ; le 17 décembre 1898 on suspendit le chantier en raison de l'écrasement des maçonneries ; elle avait parcouru 128,09 m. avec une vitesse moyenne de moins d'un mètre par jour. Le 19 juin 1899 le travail fut repris ; après le 22 septembre le fonctionnement cessa d'être régulier : l'appareil fatigué, disloqué, devint impropre à tout service ; en octobre on décida sa démolition.

Le graphique ci-dessous (fig. 202) résume la marche générale et les différentes vitesses.

La plus grande vitesse, alors qu'aucune avarie importante n'existait, fut de quatre courses, soit de 3 m. environ par 24 heures, cet avancement ne fut d'ailleurs que rarement atteint.

La vitesse moyenne était de deux courses, soit 1,50 m.

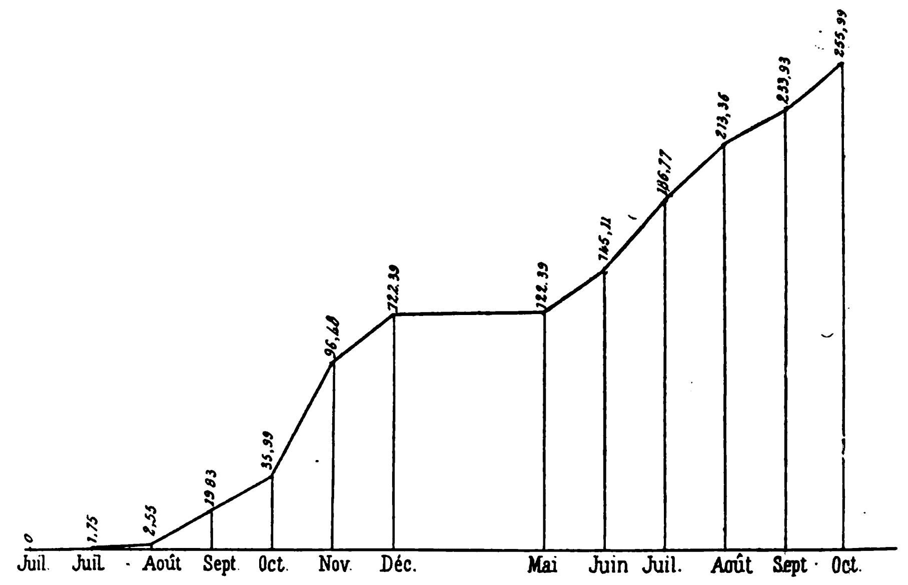


Fig. 202. — Graphique de marche du bouclier du souterrain de Meudon.

Incidents et avaries (Bouclier). — Il y eut au début d'assez

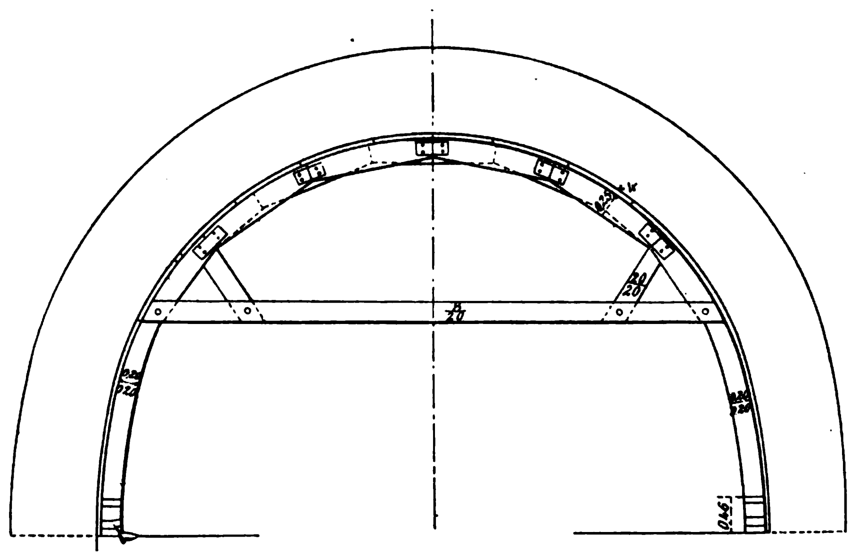


Fig. 203. — Cintre fixe. Élévation.

nombreux arrêts dans la marche, motivés par des avaries :

ruptures des vérins ou des plaques d'appui, ruptures des bielles d'entraînement du cintre mobile, mauvais fonctionnement des pompes, rencontre de sources qui, délavant les joints, nécessitèrent la pose de cintres en bois espacés de 2 m. en 2 m. En octobre, on arracha la tôle centale contournant le massif de terre, laissé sous l'appareil.

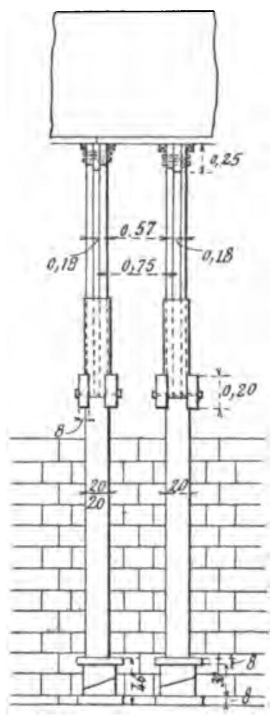


Fig. 204. — Cintres fixes. Coupe sur l'axe.

Après le grand arrêt du 17 décembre 1898 au 19 juin 1899 on facilita le glissement, par des semelles ferrées, sur les piédroits construits à l'avance ; à la fin d'août, on substitua à ces semelles les traîneaux dont nous avons donné la description, dans le but de s'opposer à l'abaissement de l'appareil et à l'écrasement des moellons qui en résultait.

Par suite des charges énormes qu'elle supporta, l'armature souffrit beaucoup ; elle s'aplatit et se faussa à la partie supérieure ; l'arrière-bec s'affaissa ; quantité de boulons d'assemblage des voussoirs du haut se brisèrent ; les tôles d'appui se déformèrent ; pour maintenir l'écartement on posa des tirants tranversaux ; le résultat fut mince.

Les vérins, les fourreaux-guides, les pompes causèrent beau-

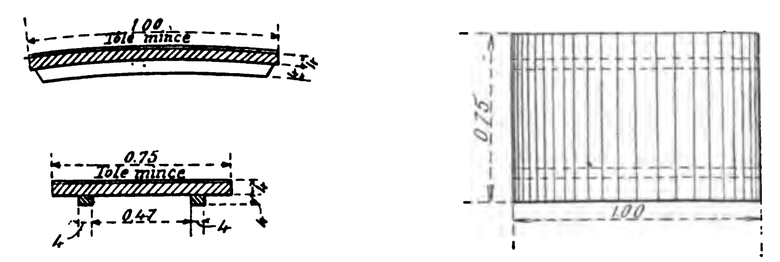


Fig. 205. — Couches, élévation et coupes.

coup de mécomptes ; il fallut relier les pistons par des étriers en fer destinés à en faciliter la rentrée, remplacer des presses, substi-

tuer des plaques en bois aux plaques en fonte pour l'appui sur la maçonnerie.

Le cintre mobile surtout donna lieu à des déboires ; on commença par employer au lieu des vérins en acier, des coins en bois dont le réglage s'effectuait plus rapidement ; puis comme il s'aplatissait on relia ses pieds par des tirants en fer ; finalement on le démonta, et on recourut à des cintres en bois (fig. 203 et 204) sur lesquels on posait comme couchis de petits panneaux menuisés recouverts de tôle (fig. 205).

Incidents (voûte). Augmentation de l'épaisseur du revêtement. — Lorsqu'en septembre 1898 on rencontra les sources que nous avons signalées, on exécuta autour de l'extrados un drain d'assainissement et on porta le dosage du mortier de 600 à 930 kg. de ciment par mètre cube de sable de Seine.

Quand l'armature fut tout entière dans la marne, indépendamment de tassements longitudinaux on constata un déversement de la calotte atteignant jusqu'à 0,70 m. ; on plaça en consolidation des cintres et des éventails espacés de 2 m. d'axe en axe sur les 128 m. déjà exécutés ; cette portion de voûte est aujourd'hui reconstruite ; on a employé du granit smillé en parement et de la meulière en blocage ; malgré la forte épaisseur donnée à cette nouvelle maçonnerie on a pu remarquer que plusieurs moellons étaient écrasés et fendus.

Après l'arrêt du 17 décembre 1898 motivé par la mauvaise tenue des maçonneries, on modifia la section type pour porter l'épaisseur du revêtement à 1,15 m., soit une augmentation de 0,35 m. correspondant à un moellon. Dans ce nouveau profil (fig. 206) la partie verticale des piédroits était presque supprimée et remplacée par une courbe unique de 4,40 m. de rayon ayant son centre à 1,37 m. au-dessus du rail. La hauteur du radier à la clef était de 6,74 m. Le bouclier fut conservé, on le remonta seulement de 0,55 m.

Au bout de 30 m. la partie supérieure de l'arrière-bec s'affaissa et pour maintenir l'épaisseur de 1,15 m. assignée aux maçonneries on revint au profil primitivement suivi.

En arrière, dans la partie de voûte exécutée par les procédés ordi-

naires, l'implantation était partout faite sur la marne ; on constata de même des tassements dans les deux sens, surtout en long ; des anneaux baissèrent de 0,80 m. après leur achèvement et le mouvement ne s'arrêta qu'après la construction des piédroits. D'importantes consolidations furent d'ailleurs effectuées : tous les 2 mètres on plaça des éventails sur de fortes pièces transversales

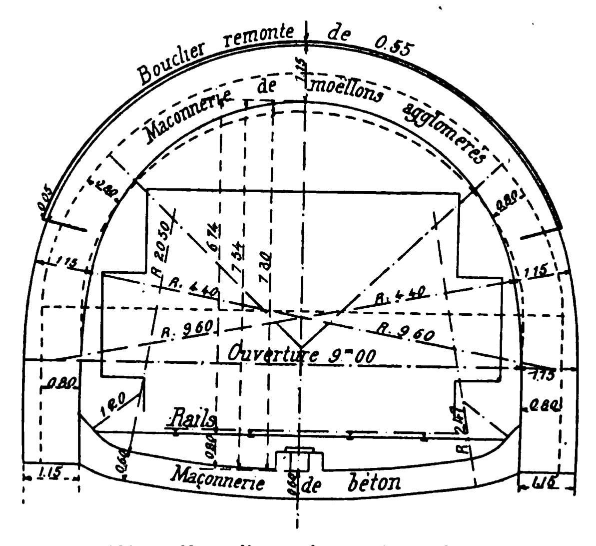


Fig. 206. — Nouvelle section après renforcement.

posées sur un plancher de madriers. Les piédroits furent maçonnés par parties de 2 ou 4 m., en quinconce, pour ne pas mettre le terrain en mouvement ; des contre-fiches très rapprochées soutenaient la voûte pendant ce travail.

Malgré toutes ces précautions, des écrasements se produisirent dans beaucoup de piliers : les deux rangs supérieurs souffrirent particulièrement ; on dut remplacer une grande quantité de moellons de granit complètement hors de service.

Mouvements extérieurs. — Dans la forêt qui couvre la colline des tassements se sont produits sur la largeur du souterrain ; des dépressions qui atteignent 1,40 m. se remarquent entre 100 et 150 m. de la tête ; sur les 200 premiers mètres des fissures se sont ouvertes de chaque côté de l'axe à la limite des abatages.

Les deux routes forestières voisines de la tête du tunnel ont subi un affaissement de 0,80 m. au moins.

Conclusions. — En résumé, le percement du tunnel de Viroflay fut un travail difficile : les argiles et les marnes en mouvement développèrent des efforts considérables contre lesquels on eut sans cesse à lutter. On n'avait pas compté sur des pressions

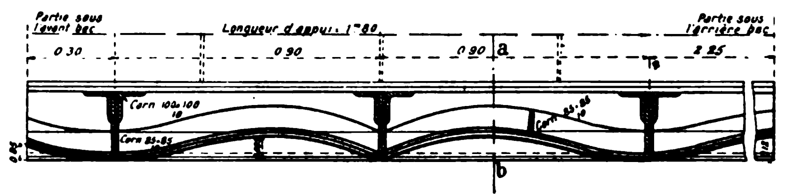


Fig. 207. — Déformations du bouclier et tôle ajoutée, coupe longitudinale.

pareilles, ce qui explique que, quoique bien conçu, le bouclier ait tant souffert et nécessité de si nombreuses réparations et de si fréquents arrêts.

Ce n'est pas seulement l'armature qui s'affaissait, ce sont les

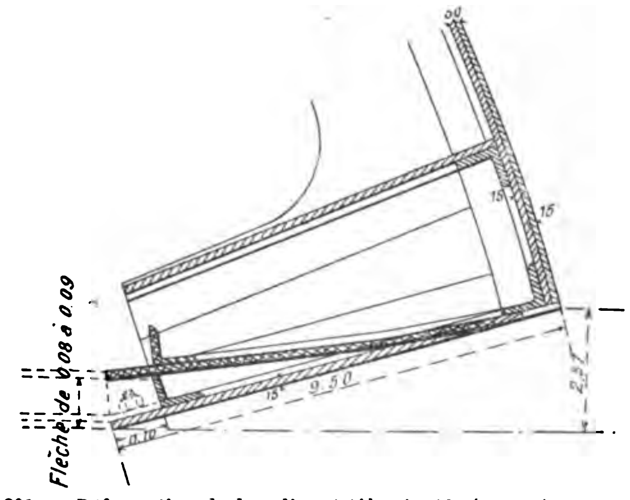


Fig. 208. — Déformation du bouclier et tôle ajoutée (coupe transversale).

appuis qui surchargés s'écrasaient ; on ne parvint à éviter le bris des moellons des piédroits qu'en recourant, après de multiples essais, aux traîneaux que nous avons décrits ; ceci suffit à donner une idée de la difficulté qu'il y a parfois à assurer

un appui inébranlable, aux boucliers excavant à demi-section.

A l'engin lui-même on peut faire plus d'un reproche.

La tôle inférieure réservant un pâté central était une erreur ; on reconnut bientôt les inconvénients d'une section aussi réduite et on revint à une utilisation meilleure de toute la hauteur.

Le cintre mobile ne fut pas plus heureux, il augmentait la surface de frottement, accroissait l'effort à développer pour la propulsion, risquait de produire un décintrement anticipé ; en peu de temps il se détraqua et on le remplaça par des cintres en bois.

L'appui direct des vérins sur le revêtement a paru donner d'excellents résultats : il faut cependant condamner l'accouplement des vérins deux à deux sur une plaque métallique ; outre que ce dispositif ne réalise pas cette indépendance absolue des presses qu'on doit toujours poursuivre, il est une source d'accidents continuels : le vérin de rappel soumis à des efforts qui ne sauraient être constamment égaux se déforme et ne fonctionne plus.

Enfin le bouclier trop peu résistant s'affaissa, malgré qu'on l'eût consolidé par des tirants ; mais peut-être faut-il regarder ces déformations comme une conséquence des mauvais terrains traversés plutôt que comme un vice de construction.

CHAPITRE VII

DÉRIVATION DES SOURCES DU LOING ET DU LUNAIN

PREMIER LOT

Exposé. — L'aqueduc principal de dérivation des sources du Loing et du Lunain traverse en souterrain, dans le premier lot, les sables de Fontainebleau.

La section est circulaire, le diamètre intérieur est de 2,50 m., l'épaisseur du revêtement de 0,30 m.

Les entrepreneurs MM. Appay et Vanel, avaient résolu d'exécuter ce travail par la méthode du bouclier.

Ils s'adressèrent à la maison Augé qui avait construit les boucliers mis en service au collecteur de Clichy et avait apporté à ses appareils des modifications nombreuses et brevetées.

Deux boucliers étaient prévus. — L'un devait exécuter le souterrain de la Salamandre et les deux tranchées qui l'encadrent, tranchées dont la profondeur variait de 4 à 7 m. La longueur de l'ensemble était de 4500 m., d'un seul tenant.

L'autre devait creuser le souterrain de Bouligny, puis les souterrains de Médicis et de Montmorillon, d'une longueur totale de 2100 m. ; après l'achèvement de cette fraction on devait le transporter à l'aval de la Salamandre pour le faire marcher à la rencontre du premier.

Un seul bouclier fut livré, qui, pour avancer, prenait appui sur le revêtement exécuté en béton ; il donna aux essais de si piteux résultats qu'on dut renoncer à son emploi ; tout le travail s'effectua par les procédés ordinaires de boisage. Il n'est cependant pas sans intérêt de donner de l'engin et de son fonctionnement une description rapide, car si la tentative échoua c'est par suite d'er-

reurs de principe et de fautes de construction ; il importe de signaler les unes et les autres, ne serait-ce que pour en éviter le renouvellement.

Bouclier. — Le bouclier (fig. 209 et 210) était du type Greathead ; il était formé d'un cylindre métallique de 6 m. de lon-

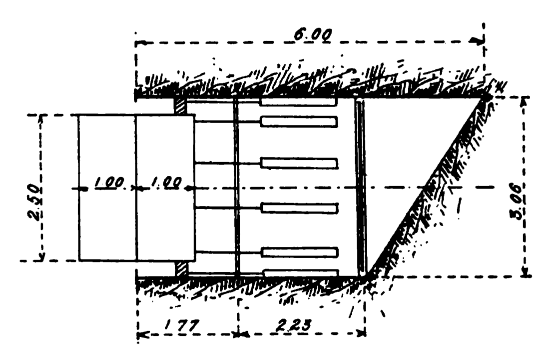


Fig. 209. — Bouclier de Fontainebleau (coupe longitudinale).

gueur et de 3,06 m. de diamètre extérieur ; en tête, l'armature était découpée en visière suivant le talus d'éboulement des terres à traverser.

Les tôles d'enveloppe de 20 mm. d'épaisseur, étaient assemblées entre elles au moyen de cornières intérieures. La rigidité était assurée à l'avant par une poutre circulaire en double T, et à l'arrière par un anneau d'une seule pièce, en acier fondu, de 0,21 m. de longueur et de 0,065 m. d'épaisseur.

L'engin était ainsi divisé en trois parties ayant pour longueurs :

L'avant-bec 2 m. ;

Le corps 2,23 m. ;

La queue 1,77 m.

Fig. 210. — Bouclier de Fontainebleau (coupe transversale, schéma).

Dix nervures longitudinales raidissaient la tôle jusqu'à l'extrémité de l'arrière-bec.

Le poids total était de 38 tonnes environ.

Vérins et machinerie. — Les vérins au nombre de 10 étaient placés dans le corps même, entre les nervures, la poutre et l'anneau; leur course était de 1 m., leur force de 60 t. ; à chaque tige de piston était fixé un refouloir en fonte d'une section rectangulaire de 0,24 × 0,84 m. destiné à la compression du béton.

Deux pompes foulantes à 2 corps, actionnées par une dynamo, fournissaient l'eau sous pression.

Cintres. — Les cintres étaient constitués par un cylindre en tôle de 7 m. de longueur, formé de 7 viroles de 1 m. chacune, réunies par des cornières boulonnées. Le premier élément était tout entier logé dans la queue de l'armature, les deux axes coïncidant; le cintre était solidarisé avec le bouclier par des cornières qui, sur cette longueur de 1 m., le reliaient aux nervures longitudinales.

Fonctionnement. — L'espace annulaire entre le cintre et l'armature se trouvait ainsi divisé en dix cases indépendantes les unes des autres. Les refouloirs rectangulaires s'engageaient dans ces cases (fig. 211) pendant le fonctionnement des vérins; ils en démasquaient l'ouverture quand les pistons étaient à fond de cylindre, dans leur position de repos. Quand l'avancement était suffisamment préparé, on remplissait les cases de béton, et on mettait les presses en fonctionnement; les vérins comprimaient le béton jusqu'au refus, puis prenant appui sur lui poussaient l'armature de un mètre en avant; à l'arrière, le cintre se déplaçait d'autant; la prise du revêtement était à ce moment suffisante pour permettre le décintrement d'un anneau.

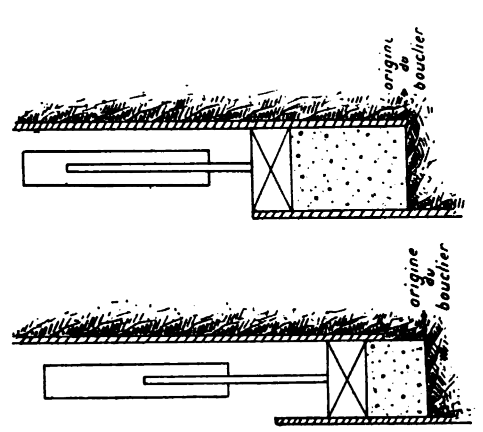


Fig. 211. — Appui des vérins (au début de la course et à mi-course).

Installations générales. — Un transporteur à hélice actionné par une dynamo devait déverser les déblais dans des wagonnets à l'arrière de l'appareil.

L'énergie nécessaire à la marche du chantier était fournie par une dynamo génératrice placée à 500 m. de l'origine du souterrain.

Essais. — L'appareil commencé dans les premiers mois de l'année 1898 devait être prêt à fonctionner au mois de juin de la même année ; mais par suite de retards incompréhensibles, ce ne fut qu'à la fin d'août qu'on l'amena à la Salamandre, à l'hectomètre 90, au fond d'une tranchée de 4,10 m. de profondeur seulement.

Le montage, l'installation des pompes et de la tuyauterie, les essais des vérins demandèrent plus d'un mois et demi ; on ne fit le premier essai de l'engin que le 18 octobre, après avoir enveloppé les cintres de béton.

L'échec fut complet : le bouclier refusa d'avancer, quoique la pression montât à 320 atmosphères. On essaya de remplacer le remblai par un massif de maçonnerie pour se rapprocher le plus possible de la situation où se trouverait l'appareil quand il serait engagé en plein souterrain : le résultat resta le même ; sous l'effort des 3 vérins du haut, la maçonnerie de béton exécutée à la main sur les cintres se comprima au point de se fissurer et même de se soulever ; mais le bouclier ne bougea point.

On pensa alors que le revêtement adhérait fortement au cintre et s'opposait ainsi à son mouvement, on le démolit et on le remplaça par des pièces de bois pour faire la butée des vérins ; les cases du haut furent fermées par du bois et remplies de béton ; l'essai ne fut pas plus heureux ; les pièces de bois fléchirent ou cédèrent, laissant les seuls vérins du haut travailler.

On refit la maçonnerie sur les cintres, en ayant soin d'interposer un papier goudronné pour éviter l'adhérence du ciment sur l'acier, et dans chaque case on plaça une pièce de bois ; cette fois l'engin s'ébranla et parcourut 25 cm., mais dès qu'on eut remplacé le bois par du béton, malgré l'emploi d'une très haute

pression, le démarrage redevint impossible : les tuyaux crevèrent, les vérins, trop forcés, furent mis hors de service ; comme dans un essai précédent, les 3 vérins du haut fissuraient et soulevaient la voûte à l'arrière ; jusqu'à la fin de leur course, ils refoulaient le béton devant eux sans provoquer l'avancement du bouclier; le béton ainsi repoussé prenait la place de la maçonnerie soulevée.

On répara les avaries, on remit les vérins en état; on enleva la moitié du cintre et on remplaça le béton par de la maçonnerie de moellons bruts ; on parvint à parcourir de la sorte 7 m., par courses d'environ 0,30 m. ; mais on dut s'arrêter, car la longueur du cintre était trop faible pour permettre une prise suffisante du mortier de ciment de Portland : la voûte à peine décintrée s'écroulait. De plus, il fallait faire monter la pression à 280 et même 300 atmosphères : les moellons calcaires étaient écrasés.

Ces essais durèrent jusqu'au 30 novembre. A cette époque on résolut de supprimer encore un anneau du cintre, ce qui obligea à modifier l'installation des pompes et de la dynamo dans l'intérieur du bouclier. Ce travail fut terminé le 9 janvier.

On recommença les essais avec emploi de la maçonnerie de moellons bruts et on obtint les mêmes résultats que précédemment, quoique le bouclier ait eu à traîner une moins grande longueur de cintre. En 6 refoulées on fit 1,60 m.; le manomètre marquait 300 atmosphères et la maçonnerie s'écrasait.

Sans se décourager, les entrepreneurs résolurent de placer l'engin au fond d'une tranchée de 6,50 m. de profondeur pour empêcher la maçonnerie de se soulever et réaliser une résistance identique sur tout le périmètre de l'armature.

L'opération dura du 10 janvier au 18 mars; le bouclier se trouva alors placé à l'hectomètre 723.

Du 8 au 30 mars, les essais reprirent; on employa des cintres mobiles en tôle, et dans chaque case on logea un moellon artificiel en béton de ciment de Portland noyé dans le béton frais ; l'avancement se produisit correspondant à la longueur du corps dur. On fit ainsi 3 m. Mais la haute pression nécessaire à la marche fissurait la maçonnerie contre laquelle on prenait appui ;

de plus, les cintres indépendants les uns des autres ne présentaient plus une rigidité suffisante : ils se déformaient.

En présence de ces échecs répétés, pressés en outre par le temps, les entrepreneurs abandonnèrent le bouclier et reprirent les procédés ordinaires.

On creusait une galerie boisée de 2,54 m. de largeur et de hauteur à peu près égale (fig. 212) ; on achevait l'abatage latéral; on boisait le ciel ; sur les cadres on plaçait les vaux constituant les éléments du cintre et on maçonnait.

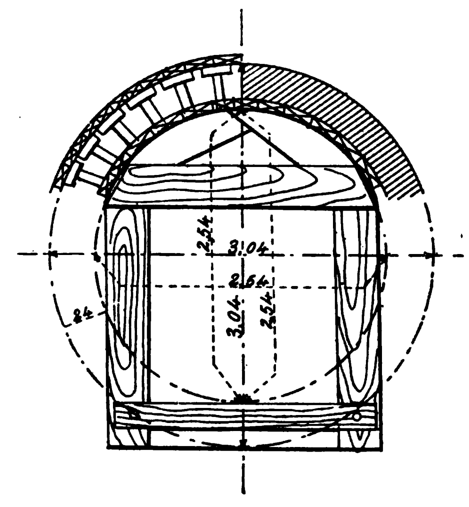


Fig. 212. — Retour aux anciens procédés, galerie boisée.

L'avancement moyen fut de 1,50 m. par poste de 8 heures, soit un total de 3 m. par jour.

Conclusions. — Le constructeur avait espéré prendre appui sur le béton du revêtement comprimé entre l'armature et les cintres ; ceux-ci, afin d'éviter les manœuvres et les pertes de temps du montage et du démontage, étaient solidarisés avec l'engin lui-même ; les vérins devaient pousser tout l'ensemble en avant.

Il y avait là une double erreur.

Le béton tassé, bourré, entre les deux tôles exerçait sur elles un effort considérable; outre l'adhérence naturelle du ciment et du fer, le frottement devait s'opposer à tout glissement des surfaces en contact, d'autant plus énergiquement que la poussée des presses était plus violente; on avait conseillé au constructeur de modifier la forme des refouloirs, notamment de les creuser en pointe de diamant pour diminuer les pressions sur les parois des cases; le résultat eût été médiocre : la méthode même était mauvaise, le système condamné d'avance ; l'expérience ne fit que confirmer la justesse du raisonnement.

D'ailleurs le cintre traînant n'est pas pratique ; pour un avancement de 5 m. par jour, vitesse qu'on peut espérer réaliser avec un bouclier bien conçu, il faudrait un cintre de 20 m. de longueur, la maçonnerie de béton exigeant 4 jours de prise au moins avant le décintrement : quel poids à traîner et quel effort de frottement à vaincre !

Les cintres eussent-ils été indépendants du bouclier, ce qui eût réduit de moitié les surfaces frottantes, que le succès n'eût pas été davantage réalisable. La réussite remarquable du siphon de l'Oise, revêtu lui aussi en béton, fut due à ce que le béton était comprimé entre deux enveloppes fixes ; l'effort des presses n'avait à surmonter que le frottement des terres sur le bouclier lui-même.

A cette erreur de principe s'ajoutèrent des dispositifs de construction éminemment vicieux ; les cornières qui reliaient les cintres à l'armature avaient deux défauts très graves : d'abord elles augmentaient la surface de frottement, déjà trop considérable, du béton contre le métal ; ensuite elles divisaient le revêtement en éléments qui, à l'arrière, par suite de la prise déjà partielle, ne se soudaient probablement pas entre eux d'une façon parfaite ; nous avons eu occasion de faire remarquer que avec l'emploi du béton, on s'expose à partager le revêtement en anneaux séparés par des surfaces de moindre résistance : c'est accroître le mal que de rendre en outre possible l'existence de plans longitudinaux de même nature.

Après de pareilles critiques il paraît inutile d'ajouter que l'engin était mal équilibré et peu facile par suite à diriger ; sur un parcours de 3 m., il avait baissé de 0,30 m.

CHAPITRE VIII

APPLICATIONS DE LA MÉTHODE A L'ÉTRANGER

On a très fréquemment employé dans ces dernières années, à l'étranger, des armatures métalliques pour le percement des souterrains : égouts, aqueducs ou tunnels de chemin de fer.

Mais en général on a fort peu transformé l'engin lui-même qui, presque partout, est resté du type Greathead. Nous ne citerons donc que quelques-uns des travaux les plus importants : soit que les méthodes connues y aient donné lieu à des remarques intéressantes, soit qu'on y ait fait des tentatives nouvelles, comme c'est le cas pour la construction du métropolitain de Boston[1].

TUNNEL DE BOSTON

Exposé. — De 1896 à 1898 on construisit à Boston un chemin de fer métropolitain à traction électrique.

L'exécution du souterrain se fit presque entièrement par la « slice method ». Dans la section n° 6, cependant, sous la rue de Trémont, de Park Street à Court Street, on eut recours à l'emploi d'un bouclier; c'est cette seule fraction du travail que nous voulons décrire.

Section transversale. — Le souterrain est à deux voies; la section transversale (fig. 213) a une largeur libre de 6,70 m. et une hauteur de 5,40 m.; le radier concave et les piédroits, hauts de 3,70 m., sont en béton; la voûte de 2,10 m. de montée

(1) Nous remercions ici notre camarade et ami Henri Moreau dont les connaissances en anglais nous furent très utiles au cours de nos recherches.

est en maçonnerie de briques. Les épaisseurs du revêtement sont :

Pour le radier, 0,50 m. ;

Pour les piédroits : au sommet, 42 cm., à la base, 1,50 m.;

Pour la voûte, 0,60 m. en clef;

Les piédroits ont un fruit extérieur et se raccordent à l'intérieur

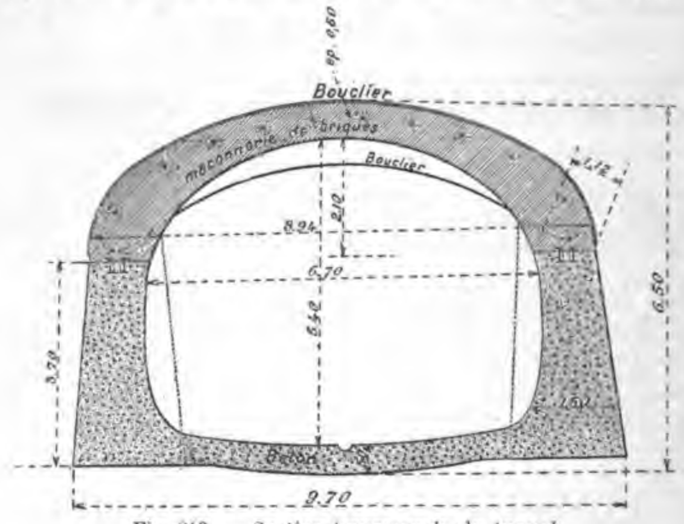


Fig. 213. — Section transversale du tunnel.

par des courbes continues à la voûte et au radier. La hauteur totale de l'ouvrage est de 6,50 m., sa largeur totale de 9,70 m.

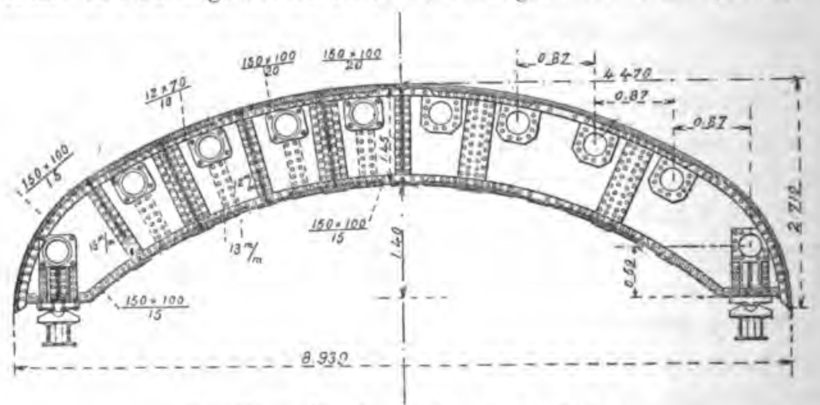


Fig. 214. — Élévation du bouclier de Boston.

Bouclier. — Le travail commença le 14 mai 1896 ; la « slice method » n'ayant pas donné de bons résultats, l'ingénieur,

M. H. A. Carson, résolut d'employer un bouclier. L'engin fut construit par la « James Russell Boiler Works C° », de Boston Sud.

Il se composait (fig. 214 et 215) d'une tôle de 25 mm. d'épaisseur épousant la forme d'extrados de la voûte à construire, sur 3,657 m. de longueur et descendant jusqu'au niveau des naissances ; cette tôle était supportée par deux arcs métalliques de 8,939 m. de portée, 2,70 m. de hauteur et 1,40 m. de flèche ; chacun des arcs était formé d'une âme de 1,115 m. de hauteur, fixée par 4 cornières de $\frac{150 \times 100}{20}$ d'une part à l'enveloppe extérieure, d'autre part à une deuxième tôle de 1,22 m. de longueur formant intrados.

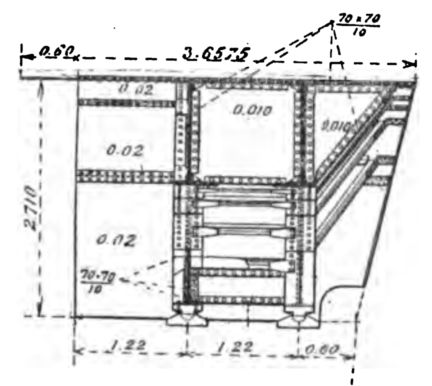
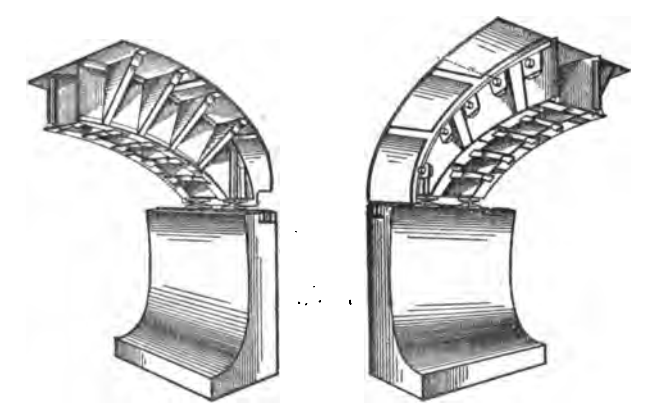


Fig. 215. — Coupe du bouclier de Boston.


Fig. 216. — Vues du couteau et de la queue.

L'armature était ainsi divisée en trois parties :

L'avant-bec, de 1,217 m. de longueur ;

Le corps, de 1,22 m. ;

La queue, de 1,22 m.

Dans le corps 9 entretoises longitudinales en tôle de 10 mm. reliaient les 2 arcs sur toute leur hauteur, formant 10 caissons où les vérins étaient logés.

La tôle d'avant-bec, découpée en visière, n'avait que 0,61 m. de longueur à la base ; elle était soutenue par 9 consoles prolongeant les entretoises du corps.

Dans la queue, la tôle restait en porte-à-faux; elle était renforcée d'une deuxième tôle additionnelle s'étendant à 0,61 m. à l'arrière pour protéger le chantier des maçons.

Appui du bouclier. — Le bouclier se déplaçait sur les piédroits construits en galerie, au préalable; à cet effet on encastrait à demi dans le béton, à la partie supérieure, deux fers en double T de 25 cm. de hauteur, reliés par une semelle inférieure de 300 $\times$ 26 mm. ; chaque arc portait à ses deux extrémités une rotule hémisphérique en acier coulé épousant exactement la cavité d'un sabot qui glissait sur les fers en double T.

Vérins. — Les vérins étaient au nombre de 10, logés dans les caissons de l'armature ; ils étaient fixés à la poutre d'avant et traversaient celle d'arrière dans des ouvertures de 239 mm. de diamètre ménagées à cet effet. Les pistons avaient 152 mm. de diamètre.

Appui des vérins. — Ils prenaient appui sur des barres de fonte de 55 mm. de diamètre, longues de 862 mm., noyées dans la maçonnerie de briques de la voûte ; on assemblait les tiges successives bout à bout par des manchons lisses de 62 mm. de longueur; l'effort des presses s'exerçait par l'intermédiaire de douilles en fonte.

Cette idée de réaliser une ligne continue de métal pour résister à la pression était due à M. Walton Aims, de New-York.

Machinerie. — L'engin pesait 22 tonnes; il avait été calculé pour résister à un effort de 640,000 livres (300 t.) correspondant à une hauteur de terrain de 4,10 m.

La tuyauterie se trouvait sous la queue de l'armature ; chaque vérin avait sa vanne de commande.

Les presses hydrauliques, pour ne pas encombrer la section, étaient placées à l'extrémité du tunnel ; des conduites de 25 mm.,

avec joints articulés, amenaient l'eau sous pression. L'intérieur de l'engin était ainsi complètement libre, puisqu'il n'y avait pas même de plancher horizontal inférieur.

Exécution des piédroits. — La longueur totale de l'ouvrage était de 167,65 m. La construction des piédroits se fit par deux méthodes successives.

A l'origine, sur 40,35 m. le travail comprenait deux phases :

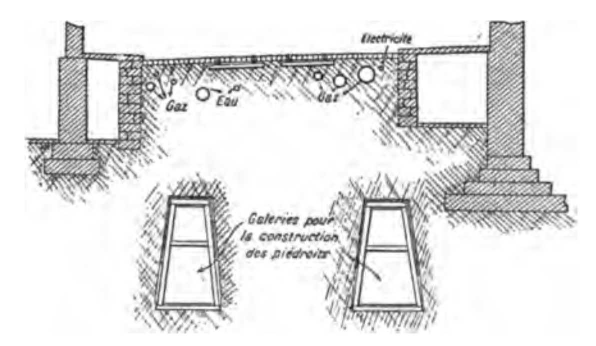


Fig. 217. — Exécution des piédroits, 1re phase.

on perçait d'abord deux galeries parallèles sur la moitié seulement de la hauteur des piédroits et on maçonnait cette partie

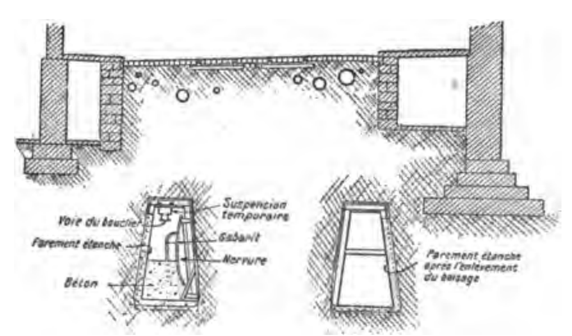


Fig. 218. — Exécution des piédroits, 2e et 3e phases.

inférieure ; au-dessus on creusait deux nouvelles galeries et on achevait la maçonnerie.

Sur le reste du tracé, soit 127,40 m., on exécuta les galeries sur toute leur hauteur, d'une seule fois (fig. 217 et 218).

Les galeries étaient boisées à la façon ordinaire ; dans les deux

cas, on retirait les poteaux et le coffrage latéraux et on appliquait directement contre le terrain une couche de béton intérieurement enduite d'un parement de ciment Portland et d'une couche d'asphalte. On substituait ainsi au boisage un revêtement étanche, entre ce revêtement et le gabarit on bourrait du béton jusqu'à hauteur des naissances.

Fonctionnement du bouclier. — Le bouclier fut monté sur place dans une excavation faite à une extrémité.

Les mineurs placés sur le front de taille excavaient une galerie

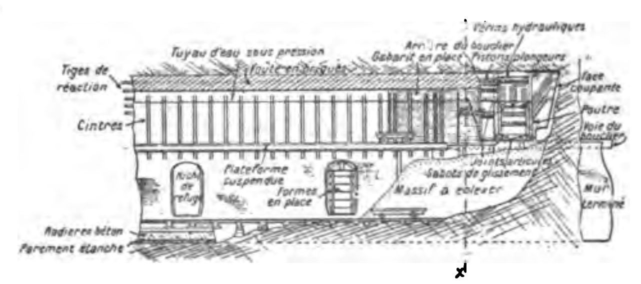


Fig. 219. — Coupe en long du chantier.

de 1,82 m. de hauteur sur toute la largeur de l'armature, en soutenant le toit par des cadres et des planches de blindage. Quand l'avancement de 0,88 m. était ainsi préparé, et il fallait 8 heures de travail pour cela, on mettait les vérins en pression;

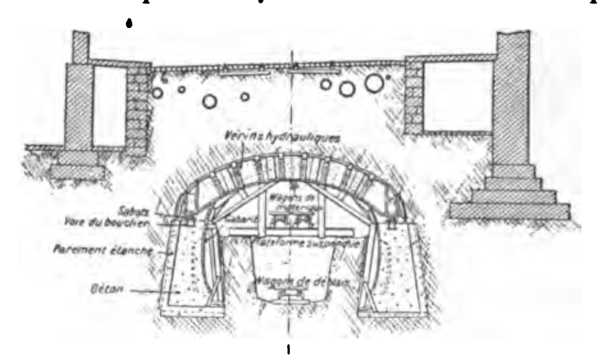


Fig. 220. — Coupe transversale du chantier.

après la course le blindage était reporté en avant pendant qu à l'arrière, à l'abri de la queue on montait un cintre et on exécutait la maçonnerie de briques.

On comblait le vide laissé par la tôle au moyen d'injections de ciment.

Les cintres étaient en bois et très légers.

La pression normale de l'eau fut de 85 kg. par centimètre carré; elle pouvait s'élever jusqu'à 210 kg. C'est par des communications électriques qu'on transmettait les ordres du front de taille à l'arrière.

On évacuait les déblais par une cunette centrale (fig. 219 et 220); l'approche des matériaux était faite par une plate-forme suspendue au cintre et à l'armature.

A l'arrière on enlevait le stross et on bétonnait le radier.

Terrains rencontrés. — Sur 137 m. de longueur on rencontra surtout du gravier et de l'argile dure où l'avancement était lent; sur 30 m. on chemina dans les sables mous : on y fit entrer la trousse coupante directement sans dégager l'avant, la hauteur de terre sur l'armature variait de 1,82 m. à 4 m.

Vitesse. — On pouvait faire trois courses par jour, soit 2,60 m. mais en moyenne l'avancement hebdomadaire était de 15,23 m. correspondant à une vitesse quotidienne de 2,18 m.

Chantier. — Le chantier fonctionnait jour et nuit; il comprenait cent vingt-cinq hommes et huit chariots le jour; quatre-vingt-cinq hommes et huit chariots la nuit.

On travaillait à raison de trois postes de huit heures.

Conclusion. — Le prix de revient du bouclier fut de 6 000 schellings soit 7 500 fr.

De ce travail plusieurs points intéressants sont à retenir :

1° La suppression du plancher inférieur ordinairement employé dans les boucliers du genre de celui-ci, ne donna lieu à aucun accident. On se trouva très bien au contraire d'avoir dégagé entièrement la section; il est vrai que par suite des faibles épaisseurs de terrain traversées les arcs n'eurent jamais à supporter de grands efforts.

2° Les rails de glissement ancrés dans les piédroits assuraient

à l'armature un appui stable. Les mouvements de galop étaient donc très faibles ; mais le déplacement latéral de l'engin était encore possible, par ripement des sabots sur les fers en double T ; il y aurait eu grand avantage, semble-t-il, à pourvoir les patins d'un talon intérieur destiné à empêcher ce mouvement de lacet ; mais peut-être eût-il alors fallu ancrer plus solidement les glissières dans le béton des piédroits pour éviter leur arrachement sous l'effort de compression latérale.

3° Par suite de l'appui des vérins sur des tiges de fonte continues noyées dans la voûte, la maçonnerie n'éprouva jamais ni écrasement, ni dislocation. La présence du métal dans le revêtement influera-t-elle sur sa résistance ? Il est vraisemblable que non, la fonte trop fragile se brisera aux moindres tassements, il n'y a pas là, à proprement parler une maçonnerie armée.

4° En ce qui concerne l'engin lui-même il faut remarquer qu'il avait une longueur extrêmement faible (3,657 m.), il était très léger, supportait un poids relativement peu considérable de terrain, chargeait peu les appuis et pouvait décrire des courbes de très petit rayon ; d'autre part, il était fort stable par ce fait que la distance des poutres maîtresses était de 33 p. 100 de la longueur totale.

Mais l'avant-bec et la queue étaient un peu courts ; d'une part le travail des mineurs eût été pénible et lent si l'attaque n'avait été faite en galerie en tête, d'autre part la maçonnerie s'effectuait par anneau complet ; n'étant pas échelonné sur deux ou trois gradins, le chantier n'aurait pas pu se prêter à un avancement rapide.

TUNNEL DE LA LIGNE BALTIMORE-BELT

Pour l'exécution du tunnel « York Road de la Baltimore Belt Line R. R. » (1892), sur une faible fraction de la longueur on excava la partie basse par un bouclier rectangulaire et la partie haute par un bouclier semi-circulaire. Ce dernier avait 4,66 m. de diamètre et 4,165 m. de longueur, il glissait sur des plaques d'acier reposant sur les piédroits, les vérins étaient au nombre de douze d'une puissance de 100 t. chacun ; ils prenaient appui

sur la voûte en briques par l'intermédiaire de têtes carrées en fonte de 300 mm. de côté, boulonnées sur un cintre en charpente de 0,43 m. de largeur et 0,20 d'épaisseur.

Mal construite, l'armature s'aplatit sous la charge d'argile qu'elle portait ; on l'abandonna.

AQUEDUC DE RIPLEY (NEW-YORK) 1896-1897

Pour alimenter la petite ville de Ripley (New-York) il fut nécessaire d'aller chercher par un tunnel l'eau de la « Twenty Mile Creek » de l'autre côté de la ligne de faîte.

Le tunnel devait avoir 213,35 m. de longueur, sa section était circulaire d'un diamètre de 1,06 m., revêtue de deux anneaux de briques.

On le commença aux deux extrémités par les procédés ordinaires de boisage ; on rencontra bientôt de l'argile, du gravier, des sables mouvants et de l'eau. De graves accidents s'étant produits, le travail fut suspendu ; après bien des tâtonnements, on le reprit à l'air comprimé qui parut d'abord réussir, mais quand les galeries ne furent plus qu'à 18,22 m. l'une de l'autre il fut impossible de maintenir la pression et de progresser. Achever en tranchée eût été trop coûteux on se décida pour l'emploi d'un bouclier.

Celui-ci (fig. 221) fut établi le plus économiquement possible, il avait 1,42 m. de longueur et 1,46 m. de diamètre, il était en tôle de 9 mm. d'épaisseur renforcée par des cornières de 19 mm., une circulaire et six longitudinales. Pour éviter l'achat des pompes et du matériel moteur à bras ou à vapeur nécessaires à la manœuvre de vérins hydrauliques, on employa trois vérins à vis en acier de 0,40 m. de longueur et de 38 mm. de diamètre ; ces vérins étaient enfermés entre l'enveloppe extérieure et une deuxième tôle intérieure formant trousse coupante avec la première ; les écrous étaient en cuivre, fixés à la cornière circulaire.

Le bouclier fut monté le 18 mars 1897 en six segments ; il fonctionna parfaitement ; à l'arrière, au lieu de maçonner directement on boisait au moyen de couronnes en charpente de 10 cm. de

hauteur et 13 mm. d'épaisseur. Quand l'armature fut arrivée au bout de sa course on retira les vérins et on laissa l'enveloppe comme revêtement extérieur.

Le bouclier de Ripley ne fut donc qu'un engin de fortune destiné à franchir un passage difficile ; à ce titre il méritait d'être signalé puisque avec une dépense très faible il assura une réussite complète.

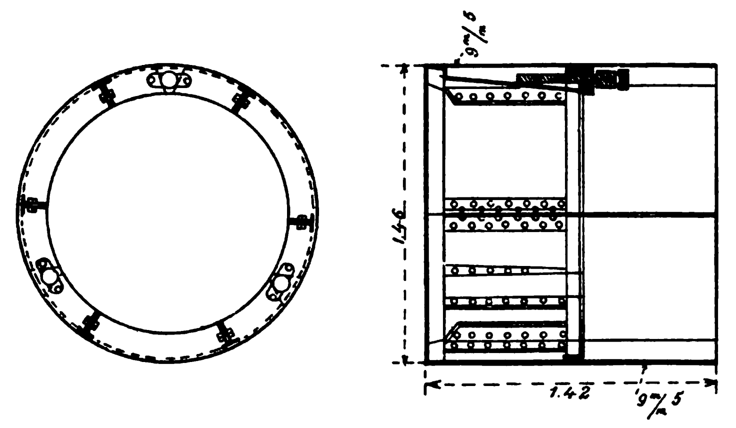


Fig. 221. — Bouclier du tunnel de Ripley, coupes transversale et longitudinale.

CENTRAL LONDON RAILWAY

Le Central London Railway relie la Cité au London-Western par deux lignes à traction électrique.

Chaque voie a son tunnel circulaire de 3,50 m. de diamètre intérieur ; les stations ont 6,45 m. de diamètre : le revêtement est métallique ; la profondeur du rail au-dessous du sol est de 24 m. à 27 m.

Petit bouclier. — Le petit bouclier avait 3,80 m. de diamètre et 2,13 m. de longueur ; il était formé de deux anneaux composés chacun de six segments et séparés par un diaphragme vertical : une porte rectangulaire de 1,60 m. × 1,97 m. donnait accès d'une partie dans l'autre. La trousse coupante était armée de petits couteaux d'acier détachables.

Les vérins hydrauliques au nombre de six prenaient appui sur le dernier anneau de revêtement ; ils étaient manœuvrés à la main.

On excavait à l'avant sur une longueur de 2 m. environ, à un diamètre moindre que celui de l'armature en maintenant le ciel par un boisage provisoire ; quand le bouclier avançait il faisait tomber un anneau de terre de 5 cm. d'épaisseur environ. La course était 0,50 m. correspondant à la longueur d'un anneau de revêtement.

Entre l'anneau et l'armature, on injectait du mortier pour protéger le métal.

L'avancement était de 1 à 2 m. en dix heures.

Grand bouclier. — Les grands boucliers avaient 6,95 m. de diamètre et 2,66 m. de longueur, ils étaient semblables aux petits boucliers sauf en ce que la cloison centrale était remplacée par 3 poutres horizontales et 2 poutres verticales divisant le front d'attaque en 12 cases indépendantes les unes des autres.

Chacune des 2 poutres horizontales supérieures portait 3 vérins hydrauliques butant au sommet d'un chariot transporteur qu'on maintenait continuellement appliqué contre le front d'attaque pour éviter les éboulements ; on retirait ces vérins pour faire avancer le bouclier.

A chacune des poutres verticales était fixé un vérin mobile autour d'un axe horizontal ; le déplacement s'obtenait au moyen de 2 vérins auxiliaires, de chaînes et de poulies ; ces 2 vérins fonctionnant comme grues servaient à placer et monter les segments.

22 vérins indépendants produisaient l'avancement en prenant appui sur le revêtement. Toute la machinerie mue électriquement était ramassée au pied de l'attaque.

On ne creusait pas de galerie boisée à l'avant ; la vitesse variait de 0,45 m. à 0,90 m. en dix heures.

LES ÉGOUTS DE MELBOURNE (VICTORIA)

Exposé. — Les égouts de Melbourne, d'une longueur de 10.684 m., furent exécutés avec des boucliers ; le diamètre de la section varie de 1,46 m. à 3,50 m.

On employa un très grand nombre de procédés différents : le revêtement, par exemple, fut fait en métal, en bois, en maçonnerie de pierres naturelles ou de blocs artificiels de béton ; on traversa des terrains secs et des couches humides, on travailla même dans l'air comprimé sur 1 600 m. de longueur environ.

Cette application de la méthode du bouclier dans des conditions si variées donna lieu à des remarques nombreuses et intéressantes que M. Georges Henry Dunlop a réunies dans un rapport à la « The Victoria Institute of Engineers ». C'est à ce rapport que nous empruntons les renseignements qui suivent :

Boucliers. — Les boucliers étaient tous cylindriques, en tôle d'acier, du type Greathead ; ils avaient 4 ou 5 fois seulement la longueur des anneaux du revêtement qu'ils servaient à placer.

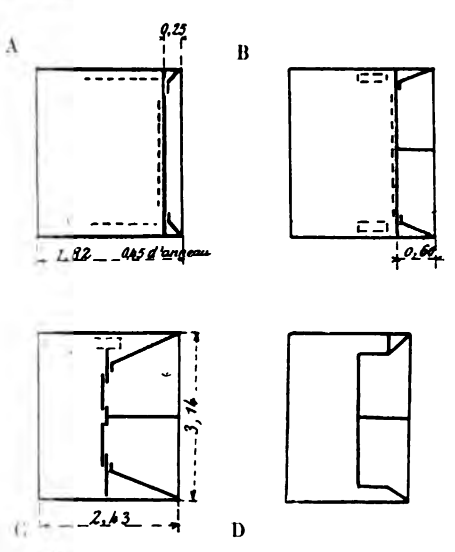


Fig. 222. — Boucliers de Melbourne.

Le bouclier représenté par le schéma A de la figure 222 correspondait aux petits égouts de 1,50 m. à 1,80 m. de diamètre ; il est partagé en 2 parties par une cloison placée à 0,25 m. de la trousse coupante et percée d'une ouverture carrée de 75 à 105 cm. de côté ; on fermait cette porte par des cloisons maintenues dans des glissières.

Le bouclier B de la figure 222 est du même genre : la chambre d'avant y est seulement un peu plus longue.

L'un et l'autre engin étaient employés en mauvais terrain, avec un système de boisage à l'avancement. Dans ce système que les Anglais dénomment « the assisted shield méthod » on excave le front d'attaque sur une certaine longueur, les boisages supportant le cul s'appuient d'une part sur un cadre, d'autre part sur l'armature.

Les boucliers C et D, appelés « the independant shield », étaient divisés par la cloison en deux chambres sensiblement égales. Un plancher horizontal et une cloison verticale partageaient la chambre de travail en 4 compartiments que fermaient des portes carrées de 60 cm. de côté ; on poussait l'engin dans le terrain qui se désagrégeait et qu'on déblayait ensuite.

Fonctionnement. — A vrai dire, à Melbourne, on employait indifféremment l'une ou l'autre méthode avec le même engin : dans les terrains doux et dans les terrains mous on poussait l'armature en avant ; dans le sable fin, il fallait excaver au préalable. La division en compartiments et surtout la fermeture de ceux-ci par des portes étaient inutiles dans un sol consistant comme l'argile sèche.

Lorsque la cloison était très près du front, il n'était pas possible que des ouvriers pussent se tenir à l'aise dans la chambre de travail ; lors donc qu'on n'employait pas de boisage à l'avancement, il fallait excaver le front de l'intérieur, au travers du diaphragme ; lorsqu'au contraire la chambre de travail était assez large, l'enlèvement des déblais s'effectuait dans les compartiments mêmes ; ceux-ci devaient avoir au moins 1,80 m. de haut.

Force motrice. — Les vérins étaient régulièrement espacés sur le périmètre du bouclier ; l'eau sous pression leur était fournie par des pompes manœuvrées à bras sous l'armature même ou à l'extérieur, à la surface du sol ; dans ce dernier cas elle arrivait par des tuyaux de 2 à 3 cm. de diamètre ; un dispositif télescopique d'une longueur de 2,40 m. environ permettait l'avancement de l'engin.

Revêtement en blocs artificiels. — A Port-Melbourne, pour un égout de 2,40 m., le revêtement fut établi en blocs artificiels de béton ; les anneaux avaient 0,47 m. de longueur, ils comprenaient 18 blocs de 0,457 m. et 22 blocs de longueur moitié moindre équivalant à 11 des premiers ; le revêtement avait 0,38 m. d'épaisseur avec une chape de 20 mm.

Les vérins prenaient appui sur les blocs par l'intermédiaire

d'une traverse en bois de 0,30 m. × 0,15 m. ; les redans étaient remplis par des pierres d'attente de 11 cm.

Ce procédé donna lieu aux observations suivantes :

1° Quelque soin qu'on prît à ajuster les pierres d'attente, les unes trop longues supportaient une pression excessive, les autres trop courtes étaient entièrement déchargées. Il aurait fallu diminuer le nombre des voussoirs ou accroître celui des vérins de façon à avoir un vérin pour 3 voussoirs sur lesquels la pression se fût également répartie.

2° L'eau délavait le mortier des joints : on remédiait à ce grave inconvénient par l'emploi d'air comprimé à une pression suffisante.

3° Les blocs s'écrasaient ou les joints se brisaient parfois sous la pression des vérins ou sous le frottement de l'armature.

Revêtement en « bluestone ». — Dans l'égout sous « Stoney Creek » on remplaça le béton par la « bluestone » pour résister efficacement à la poussée des vérins : c'était un procédé coûteux qu'il n'était pas possible de généraliser.

Sur une partie d'un égout de 1,30 m. on en fit usage dans des conditions très spéciales : 0,90 m. à 1,20 m. d'une bonne argile séparaient seulement le bouclier de 9 m. de sable humide ; au lieu de maçonner le revêtement dans la queue, 3 ou 5 voussoirs seulement, ceux du radier, y étaient placés ; le reste de l'anneau ou mieux l'achèvement de l'anneau précédent était exécuté immédiatement derrière l'engin : l'argile restait sans support sur cette longueur pendant le temps nécessaire à ce travail. On bourrait fortement la maçonnerie contre le terrain, avec du sable de façon à ne laisser aucun vide.

Revêtement en fonte. — La longueur de l'anneau variait de 30 à 80 cm. ; la longueur de 45 à 60 cm. fut reconnue la plus pratique ; les joints étaient ordinairement garnis de feutre goudronné, quelquefois de bois tendre de 6 mm. d'épaisseur.

Les joints longitudinaux étaient continus, ce qui donne moins de résistance au revêtement que s'ils étaient en découpe.

Dans un égout de 1,77 m. de diamètre, les anneaux de fonte

avaient 38 cm. de longueur, 25 mm. d'épaisseur avec des nervures faisant saillie de 9 cm. ; ils étaient réunis par des boulons de 19 mm. à 152 mm. d'intervalle : en deux circonstances, ce revêtement s'affaissa par insuffisance d'épaisseur.

On bétonna l'intérieur sur une certaine épaisseur, de façon à ce que la disparition du métal par oxydation ne soit pas une cause de ruine pour l'ouvrage.

Deux monteurs furent construits ; l'un consistait en un truc portant le monteur proprement dit, constitué par un bras mobile ; le truc était suffisamment élevé pour que les wagons de déblais pussent passer par-dessous ; d'après M. Dunlop, cet appareil était fort encombrant et peu commode. Le deuxième monteur ne fut que peu employé.

Revêtement en bois. — Dans la section n° 6 à « North Yarra Main, » à Melbourne Nord, on fit usage sur plus de 800 m. d'un revêtement en bois représenté ci-dessous ; le diamètre de la section était de 1,28 m.

Le revêtement (fig. 223) se composait d'anneaux de 2,02 m. de

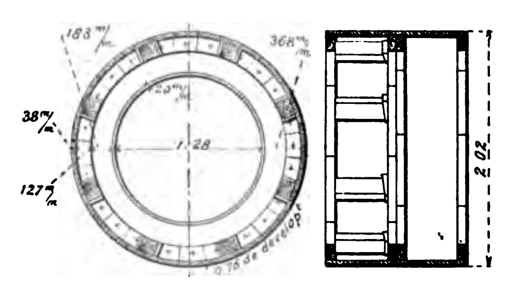


Fig. 223. — Revêtement en bois. Coupes transversale et longitudinale.

diamètre extérieur ; chaque anneau était formé de 2 cintres recouverts de couchis ; les autres étaient fortement étrésillonnés entre eux pour pouvoir résister à la poussée des vérins : les entretoises étaient disposées de façon à réaliser une ligne d'appui continue. Chaque anneau était placé de façon que les joints fussent en découpe par rapport à ceux du précédent ; les deux cintres juxtaposés étaient reliés par des boulons fortement serrés.

Le nombre des joints du platelage était très grand, mais le gonflement du bois donnait une étanchéité satisfaisante, la rigi-

dité des anneaux était pleinement assurée par les entretoises longitudinales ; les cintres d'ailleurs étaient l'élément principal de la résistance puisque d'une part ils résistaient à l'effort des vérins et que d'autre part le platelage leur transmettait la charge du terrain. On réalisa une économie de 70 p. 100 sur le prix d'un revêtement en fer.

Travail dans l'air comprimé. — Trois types d'écluses à air furent mis en service. A l'Yarra, l'une consistait en deux parois de maçonnerie percées d'ouvertures fermées par de lourdes portes de fonte.

La deuxième était un cylindre en tôle rivée de 3,04 m. de longueur et 1,67 m. de diamètre ; la tôle avait 6 mm. d'épaisseur, 12 mm. aux extrémités ; elle était renforcée par des goussets puissants.

Le troisième type fonctionna dans les petits tunnels revêtus en métal ; il consistait simplement en deux cloisons de tôle boulonnées aux nervures circulaires des segments ; cette portion du tunnel était complètement cimentée pour assurer l'étanchéité ; les nervures longitudinales avaient été coupées pour permettre aux cloisons de porter contre le revêtement.

La première écluse était coûteuse, longue à construire et encore plus à déplacer ; le troisième type était le plus pratique.

Vitesse. — L'emploi des méthodes ordinaires donna pour un petit égout une vitesse de 3,047 m. par jour sans compter le bétonnage et la maçonnerie ; avec un bouclier et un revêtement en « bluestones » la vitesse fut la même ; elle fut de 30 p. 100 plus forte avec le métal. A Graham Street, avec emploi de blocs artificiels et un travail à l'air comprimé dans le « silt » on parcourut 304 m. en 14 jours, ce qui correspond à une vitesse quotidienne de 2,13 m.

Avec les méthodes ordinaires dans l'argile sableuse pour exécuter 304 m. il fallut 23 jours : 17 pour creuser la galerie, 6 pour élargir la section et maçonner.

Dans le « silt » et dans l'argile, avec revêtement en fer ou en bois, on fit avec le bouclier jusqu'à 6,9 m. par jour.

Prix de revient. — Les prix de revient suivants se rapportent à l'exécution par le bouclier d'un égout de 1,90 m. de diamètre en terrain facile :

Egout maçonné, construction ordinaire, par pied (0 m. 304)	32 schillings	soit	40 fr.
Revêtement en fonte et béton	49	— —	61 fr. 15
— en bois	32	— —	40 fr.
— en fonte avec bétonnage entre les cornières seulement	40	— —	50 fr.

TUNNEL DE L'YARRA

Le siphon qui passe sous Stony Creek mérite une mention particulière, il a une longueur de 475 m. environ et un diamètre de 2,58 m.

Une reconnaissance préliminaire avait montré que sur 274 m. le terrain était très mauvais : la galerie s'était promptement remplie de vase et on n'avait pu rencontrer le terrain solide.

Bouclier. — Le travail fut exécuté avec un bouclier représenté ci-dessous et construit par M. Mephan Fergusson de Melbourne.

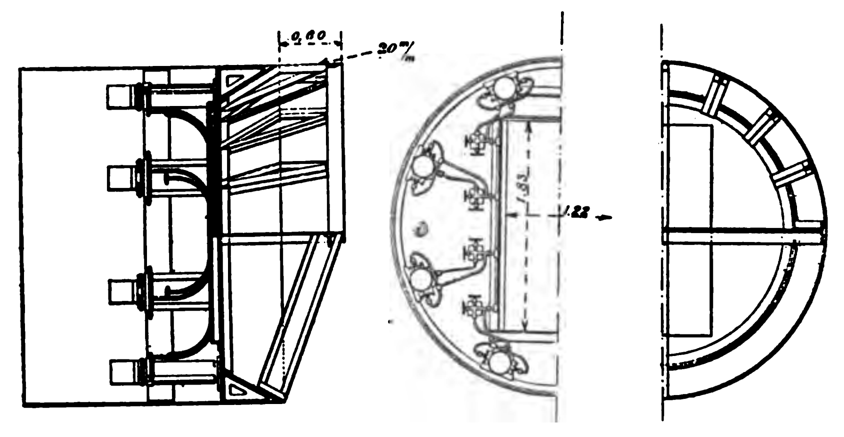


Fig. 224. — Coupe longitudinale du bouclier.

Fig. 225. — Coupes transversales du bouclier.

Ce bouclier (fig. 224 et 225) était du type Greathead, en tôle de 20 mm. d'épaisseur; une visière de 0,60 m. de longueur prolon-

geait l'enveloppe cylindrique ; des consoles fixées par des cornières assuraient une rigidité suffisante.

Un diaphragme vertical et un plancher horizontal reposant sur des cornières et un fer à T divisaient l'avant en quatre compartiments. La chambre de travail était séparée du corps proprement dit par une cloison percée d'une ouverture de 1,82 m. × 1,21 m. ; on pouvait fermer cette ouverture par une porte divisée elle-même en 4 panneaux mobiles dans des coulisses. Les portes du bas glissaient par-dessus celles du haut, on les tenait ouvertes par des boutons saillants engagés dans des crochets ; un léger choc suffisait à les dégager et à les faire retomber dans leur position de fermeture.

Vérins. — Les vérins en fonte, au nombre de 8, avaient 24 cm. de diamètre extérieur, 31 mm. d'épaisseur ; leur longueur était de 77 cm. ; les pistons avaient 152 mm. de diamètre et 50 cm. de course ; ils étaient à simple effet, avec cuirs emboutis.

Le rappel de chaque vérin s'obtenait par deux petits pistons plongeurs de 5,67 cm. carrés, placés de part et d'autre. L'admission de l'eau s'effectuait à la fois dans les 3 cylindres, mais les pistons de rappel ne fonctionnaient qu'au moment où on enlevait la pression du cylindre principal.

Les vérins prenaient appui : contre le revêtement maçonné au moyen de têtes assemblées aux pistons par des boulons fixes ; contre le revêtement métallique par des secteurs d'acier coulé de 108 cm. de longueur répartissant la pression sur une fraction suffisante de la couronne. Pour protéger la maçonnerie ou interposait en outre, entre elle et les têtes, des pièces de bois courbées suivant le rayon de la section.

Machinerie. — L'eau sous pression était fournie par une machine à vapeur demi-fixe, installée à l'extérieur, à la surface du sol ; elle arrivait par des tubes de fer reliés au bouclier par un tuyau en cuir permettant l'avancement.

Fonctionnement. — Les 2 portes supérieures étant ouvertes, un homme excavait dans chacun des compartiments, sous la

visière, de la longueur d'une course; ce travail achevé on fermait les portes et on excavait de la même façon dans les deux compartiments inférieurs. Puis on mettait la pression sur les vérins et on avançait de 0,50 m.

Incidents divers. — Le tunnel fut commencé par les deux extrémités à la fois; à partir du puits sud on employait les méthodes ordinaires de boisage et on revêtait en béton de ciment; à partir du puits nord on avançait avec le bouclier et on maçonnait en « bluestones ».

A 174 m. du puits sud on dut s'arrêter : le revêtement se fissurait sous l'effort de compression de l'argile gonflée; depuis le puits nord la maçonnerie fut poussée jusqu'à 105 m. sans incidents; en ce point on rencontra un banc de sable aquifère : il fallut suspendre le travail; le tunnel se remplit immédiatement d'eau, on installa des pompes Worthington débitant 40,860 m³ à l'heure.

Après diverses tentatives malheureuses on songea à employer l'air comprimé; le bas du siphon était à 22 m. au-dessous de l'étiage, la pression de l'eau semblait indiquer que la nappe rencontrée montait jusque-là; pour parer aux effets des crues ou des grandes marées, il fallait compter sur une hauteur de 27 m. soit une pression de 2,9 kg. par centimètre carré.

Le terrible accident de Vendredi saint 1895 avait fait une si profonde impression sur les constructeurs et leur personnel qu'on les décida difficilement à travailler à l'air comprimé.

On réalisa une surpression de 1,3 kg. seulement par centimètre carré, mais les dispositions étaient prises pour fournir 3 kg. en cas de besoin. La maçonnerie étant trop perméable on employa un revêtement de fonte de 30 mm. d'épaisseur avec maçonnerie de béton à l'intérieur sur toute la longueur du banc de sable soit 109 m.

Chaque anneau avait 0,403 m. de longueur, saillies comprises, et était formé de 7 segments de 1,38 m. de longueur plus un claveau de 0,431 m.; la course du bouclier étant de 0,50 m. on pouvait mettre un anneau entier en place à chaque avancement.

Les nervures avaient 38 mm. d'épaisseur, 88 mm. de hauteur; les boulons avaient un diamètre de 32 mm. et étaient distants de 20 cm.

Le terrain ayant été préalablement reconnu sur 15,23 m. on essaya de marcher sans l'air comprimé ; les segments étaient mis en place : ceux du bas par un monteur formé d'une poulie et d'une chaîne sans fin fixée à la cloison ; ceux du haut au moyen d'un échafaudage volant. Le monteur projeté, plus perfectionné, ne fut pas installé ; il aurait encombré la section : les wagonnets ayant 0,98 de hauteur, il n'aurait laissé que 50 mm. d'espace libre au-dessus, on aurait perdu du temps à recharger la terre excavée.

Les joints furent remplis en feutre goudronné ; contrairement à toute attente, l'eau fut peu abondante ; avec des tuyaux en fonte de 10 cm. placés à la partie inférieure du revêtement on obtint un asséchement suffisant du front de taille sans qu'il se produisît un entraînement appréciable des sables.

Dans la partie en pente du tracé, pour empêcher l'inondation du front par l'eau venant de ces tuyaux, on élevait entre leur extrémité et le talus des terres une petite digue et on pompait directement l'eau du front de taille.

On revêtait extérieurement le métal d'une enveloppe en mortier de ciment envoyé sous pression.

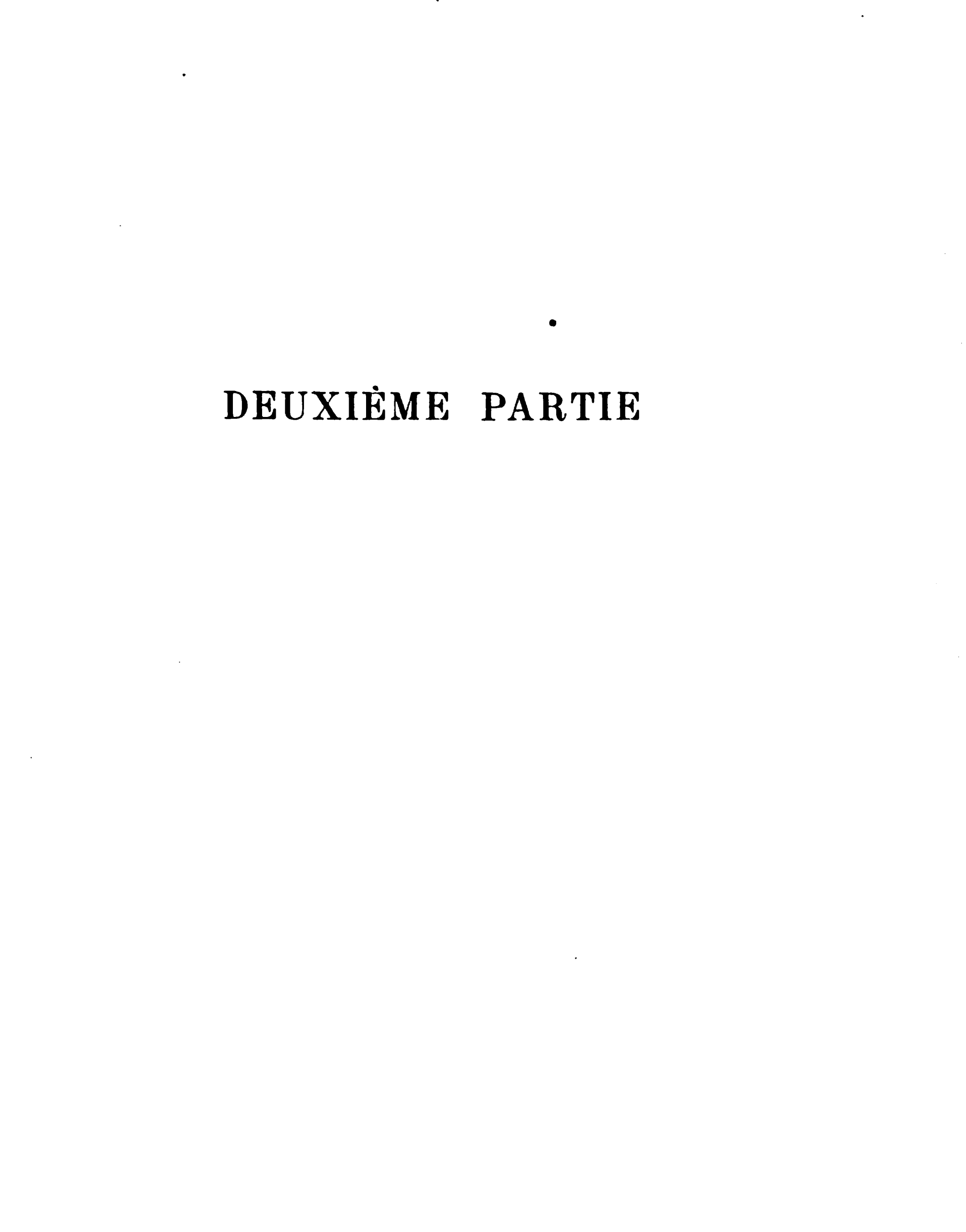
L'avancement moyen fut de 5 anneaux par jour, soit 2,50 m.

Toutes les semaines on sondait le terrain pour le reconnaître : aucun accident ne se produisit ; après qu'on eût traversé le banc de sable on reprit le revêtement en « bluestones ».

Le chantier était éclairé à l'électricité ; un ventilateur envoyait de l'air frais jusqu'à l'extrémité de la chambre de travail.

Déformation des anneaux. — Des mesures précises faites sur le revêtement ont montré que les anneaux s'aplatissaient sensiblement sous la pression des terres, voici quelques-uns des résultats observés :

Nos de l'anneau	Diam. horiz.	Diam. vertic.	Différence.
2	3 m. 1748	3 m. 1400	34 mm.
40	3 m. 1764	3 m. 1330	43 mm.
75	3 m. 1764	3 m. 1360	40 mm.
115	3 m. 1764	3 m. 1494	27 mm.
155	3 m. 1620	3 m. 1528	10 mm.
197	3 m. 1740	3 m. 1528	22 mm.
236	3 m. 1748	3 m. 1400	34 mm.



DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE PREMIER

DE LA MÉTHODE

Exposé. — Depuis 1825, époque à laquelle il avait été imaginé par Brunel pour creuser sous la Tamise le premier souterrain, le « bouclier » était resté un instrument délicat et coûteux, auquel on ne recourait que pour les travaux impossibles à mener à bien par les méthodes courantes : franchissement des rivières, traversée des terrains vaseux et fluents, des sables aquifères, des argiles sèches ; les conditions onéreuses de son emploi, le coût élevé du revêtement métallique dont on l'accompagnait toujours le faisaient réserver aux seuls souterrains où la question d'économie ne venait qu'en troisième ligne, après celles de sécurité et de réussite.

En 1895, aux travaux du collecteur de Clichy, M. Chagnaud fit un premier pas dans une voie nouvelle : il se servit du bouclier pour construire un boisage à l'abri duquel les maçons venaient exécuter le revêtement de meulière. L'année d'après, dans la partie *intra muros* du même collecteur, M. Fougerolle perfectionna le procédé, fouillant et maçonnant d'un seul coup toute la section sous le couvert de l'armature elle-même.

Les deux tentatives furent couronnées de succès : outre une sécurité absolue on avait obtenu une régularité parfaite de fonctionnement, une rapidité d'avancement remarquable et, qui plus est, on avait réalisé une économie notable sur le coût ordinaire.

Une réaction se fit immédiatement en faveur d'une méthode jusqu'alors peu utilisée en France ; on crut voir dans le bouclier l'engin idéal qui permettrait de traverser vite et bien n'importe quel terrain, qui se plierait docilement à toutes les nécessités, au

franchissement des hautes montagnes comme au cheminement discret sous les chaussées des villes.

C'est sous ce rapport surtout, qu'on fonda sur l'engin nouveau les plus belles espérances ; les travaux urbains de longue haleine sont d'une exécution difficile, on est gêné par les ouvrages d'intérêt général qu'on rencontre à chaque instant : collecteurs, conduites d'eau et de gaz, canalisations d'air ou d'énergie électrique ; on se heurte aux fondations des édifices ou des maisons particulières ; on reste soumis à mille sujétions : il faut maintenir la circulation, réduire au minimum le nombre des accès et des puits de descente, ne pas encombrer ni désorganiser les chaussées.

Le bouclier semblait devoir admirablement convenir à ces cas spéciaux : on l'y appliqua aussitôt ; l'approche de l'Exposition universelle de 1900 étendit beaucoup le champ d'expérience ; presque en même temps seize armatures furent mises en service et fonctionnèrent rien que dans Paris.

Sans aucun doute la méthode aurait fait plus de progrès si ces applications multiples s'étaient espacées sur une période plus longue ; les mécomptes, les accidents, les erreurs mis en lumière sur un chantier auraient été pour les constructeurs suivants d'un profitable enseignement : la simultanéité fut trop grande pour que l'expérience de l'un pût utilement servir aux autres.

Mais la multiplicité des moyens et la diversité des procédés furent telles que du simple rapprochement des faits, tout un corps de doctrine semble se dégager. Les insuccès surtout sont instructifs : ils dénoncent avec netteté les voies dans lesquelles il faut éviter de s'engager à l'avenir, et comme ils sont nombreux et variés, le champ des tentatives nouvelles s'en trouve considérablement restreint.

Est-ce à dire qu'on puisse dès maintenant certifier de quel côté sera le succès ? Ce serait se montrer téméraire ; nous nous bornerons, quant à nous, à coordonner les faits, pour tâcher d'en dégager ces trois points :

1° Dans quelles conditions peut ou non s'appliquer la méthode ;

2° Comment il faut choisir et construire l'engin ;

3° Ce qu'on est en droit d'en attendre s'il est judicieusement conduit et utilisé.

Parcours des boucliers. — La première conclusion qui s'impose est celle-ci : le bouclier n'est pas un outil universel susceptible de s'appliquer à tous les travaux et à tous les terrains ; ici il réussira parfaitement malgré des imperfections de principe ou de construction, là il échouera piteusement quelles que soient l'ingéniosité des dispositions prises et l'habileté du personnel.

Il suffit de rappeler en un tableau sommaire les parcours des différentes armatures pour montrer combien leurs carrières furent inégales.

DÉSIGNATION des Boucliers	DATE de la mise en service	DATE de l'arrêt	PARCOURS total
			m.
Collecteur de Clichy *extra muros*.	Déc. 1895	Novembre 1896	1255 »»
Collecteur de Clichy *intra muros*.	2 avril 1896	29 août 1898	2481,20
Compagnie d'Orléans, bouclier Sully	15 juin 1898	2 juillet 1899	866,26
Compagnie d'Orléans, bouclier de l'Institut.	3 mai 1899	29 août 1899	356,44
Collecteur de Bièvre, bouclier du Ministère	1er nov. 1898	24 février 1899	183,45
Collecteur de Bièvre, bouclier Solférino.	5 nov. 1898	1er mars 1899	286,50
Collecteur de Bièvre, bouclier Dioudonnat.	15 sept. 1898	7 février 1899	111,48
Métropolitain parisien, bouclier Champigneul (Vincennes) . .	28 mai 1899	4 octobre 1899	464,25
Métropolitain parisien, bouclier Champigneul (Reuilly). . . .	7 mars 1899	16 octobre 1899	710,12
Métropolitain parisien, bouclier Champigneul (8e lot)	20 mars 1899	3 septembre 1899	399 »»
Métropolitain parisien, bouclier Dioudonnat (Diderot)	28 mars 1899	2 août 1899	40,44
Métropolitain parisien, bouclier Dioudonnat (Lyon)	12 avril 1899	28 juin 1899	164 »»
Métropolitain parisien, bouclier Dioudonnat (Saint-Antoine) .	8 mars 1899	8 septembre 1899	328,10
Métropolitain parisien, bouclier Weber (Saint-Paul)	26 avril 1899	20 juin 1899	42,28
Métropolitain parisien, bouclier Weber (Châtelet).	26 mai 1899	27 juillet 1899	96,63
Métropolitain parisien, bouclier Lamarre (6e lot)	31 janvier 1899	30 juin 1899	90 »»
Métropolitain parisien, bouclier Lamarre (7e lot).	20 février 1899	2 juillet 1899	209,78
Compagnie de l'Ouest, bouclier de Viroflay.	27 juillet 1899	21 octobre 1899	255,99
Siphon de l'Oise	nov. 1899	Décembre 1898	276,42
Tunnel de Boston	»	»	167,65

Certes, et nous avons déjà insisté en détail sur ce point, plusieurs de ces engins étaient mal conçus et mal dirigées : mais cela ne suffit point à expliquer leur insuccès, il faut faire entrer en ligne de compte, et pour une très grande part, la nature même du sol qu'il s'agissait de traverser.

Inconvénients de la méthode ; travaux urbains. — On s'attendait à une réussite parfaite sous les chaussées des villes : le plus souvent en effet on y a affaire à des remblais peu ébouleux, le poids de terre à supporter n'est pas considérable, les efforts sont peu intenses, les mouvements et les glissements des différentes couches peu à craindre ; la méthode en outre, avec des précautions, semblait ne devoir entraîner aucun tassement ; elle s'accommodait d'ailleurs parfaitement de la réduction au minimum des puits d'accès par le fait même de l'attaque unique.

On avait compté sans les incidents multiples qui se produisirent ; le sous-sol des rues, surtout à Paris, n'est pas du tout homogène : à chaque instant on y rencontre des vieilles maçonneries, fondations de bâtiments disparus, collecteurs désaffectés, canalisations hors de service ; de temps en temps on découvre des fosses, des caves insuffisamment comblées.

Dans de pareilles conditions, le fonctionnement d'une armature métallique est délicat, le résultat aléatoire. Si, faute d'une connaissance suffisante de la nature du front d'attaque, on fonce en avant en exagérant la pression, au mépris des indications du manomètre, on fausse la tôle d'avant-bec, on fatigue la machinerie, on disloque tout l'appareil ; si au contraire on veut préparer et faciliter la marche en excavant sur toute la section à ouvrir, il n'est pas possible de trancher les obstacles exactement au gabarit : on retire le moellon entier qui gît en travers du couteau, on arrache le pilotis qui barre la route, on fait tomber toute la voûte dont une partie seulement était dangereuse : qu'en résulte-t-il ? Des vides se créent nombreux sur tout le pourtour de l'enveloppe ; avant même qu'on ait maçonné, les terres petit à petit s'ébranlent, descendent, se tassent ; la trépidation qui résulte du passage des voitures facilite singulièrement le mouvement, l'injection ultérieure est impuissante à le paralyser ; comme on

est à peu de distance sous la chaussée, le phénomène s'étend jusqu'à celle-ci qui s'affaisse.

D'ailleurs insuffisamment chargée, l'armature est difficile à diriger : les terres de l'arrière plus ébranlées que celles de l'avant exercent une poussée plus considérable, le bouclier lève du nez; pour peu qu'il soit mal équilibré, ce mouvement de galop prend des proportions inquiétantes ; outre qu'on ne parvient qu'avec peine à suivre le tracé, le ciel de la fouille tailladé avec excès s'effondre.

Si, comme cela arriva aux travaux de déviation du collecteur de Bièvre, on vient à passer sur une fosse à peine remblayée, brusquement l'engin s'enfonce en écrasant le dernier anneau maçonné; même quand il n'y a pas d'accident de personnes, la situation ne laisse pas que d'être critique : il faut ouvrir une chambre, relever le bouclier et repartir... peut-être pour recommencer quelques mètres plus loin.

Souterrains en rase campagne. — Dans les travaux en rase campagne, pareils déboires ne sont pas à craindre ; le terrain est plus homogène, les sondages préliminaires renseignent sur sa nature avec une approximation suffisante; les obstacles isolés dont l'enlèvement crée une cloche dangereuse sont une exception. A condition de rechercher et d'adopter la forme et la méthode qui conviennent le mieux aux couches signalées on est assuré d'un résultat satisfaisant. Sans doute il se produit encore quelques vides, que l'injection comble mal, mais si la profondeur est grande le tassement ne saurait s'étendre d'une façon sensible jusqu'à la surface du sol; la réussite est sous ce rapport plus parfaite qu'avec les meilleures méthodes de boisages.

Inconvénients de la méthode. — Mais dans tous les cas, la méthode du percement des souterrains par l'emploi des armatures métalliques offre un certain nombre d'inconvénients qu'on ne peut songer à dissimuler.

Lenteur relative de la méthode. — A moins de vouloir mettre plusieurs engins simultanément en service sur une même sec-

tion, ce qui conduirait à des dépenses excessives et à un prix de revient inadmissible, le travail s'effectue avec une seule attaque ; c'est une cause certaine de lenteur, si rapide que soit la méthode ; par les procédés ordinaires de boisage, au contraire, s'il importe d'arriver vite, il est facile de percer d'abord une galerie, puis d'y répartir le nombre nécessaire de chantiers d'abatage.

Tous les déblais sont obligés de sortir par l'issue unique, tous les matériaux doivent arriver par le même chemin : par l'augmentation progressive du parcours souterrain ainsi imposé aux uns et aux autres les frais de manutention et de transport augmentent ; à Paris, pour les travaux du chemin de fer métropolitain, en présence des inconvénients d'une telle sujétion, on n'a pas hésité à renoncer aux prescriptions imposées aux Entrepreneurs : on les a laissés multiplier les accès et s'alimenter directement de sable, de chaux et de pierres, partout où la circulation n'avait pas trop à en souffrir.

Mais s'il est possible de se réserver ainsi des issues nombreuses. les méthodes courantes de boisage sont d'une extrême rapidité ; les puits constituent autant d'attaques pour la galerie préliminaire, qui, par suite, est promptement percée ; avec les moyens actuels d'élévation et de transport, l'enlèvement des déblais d'une galerie n'est plus en effet qu'un jeu ; il est alors aisé de multiplier les chantiers d'abatage ; l'évacuation des terres et l'amenée des matériaux sont assurées par la galerie même.

Tassements. — Exception faite des mouvements qui proviennent de la flexion du revêtement ou du manque de solidité des cintres, il est très difficile d'éviter tout tassement du terrain qu'on traverse ; dans les travaux urbains surtout, il faut s'attendre à ce que la chaussée s'affaisse plus ou moins. Nous avons déjà dit qu'on est toujours forcé d'enlever dans leur entier les obstacles qu'on trouve à chaque instant dans le sol des villes, maçonnerie, pièces de bois, fragments de métal ; il en résulte des vides et les terres se mettent en mouvement.

Il est une seconde cause de tassements que tous les constructeurs se sont depuis longtemps ingéniés à combattre : nous voulons parler du vide correspondant à l'épaisseur de la tôle, vide

que produit chaque course au-dessus de l'anneau de maçonnerie correspondant ; cet espace annulaire peut atteindre des dimensions relativement considérables car il est toujours nécessaire de ne pas bloquer le revêtement sous l'enveloppe afin d'éviter son entraînement par le frottement de la queue ; si l'engin est mal conçu et se déverse en arrière, la marge qu'on réserve ainsi peut être fort grande. N'y aurait-il d'ailleurs que l'épaisseur de la tôle, que le volume à combler ne serait pas négligeable ; si nous prenons en exemple un bouclier de 10 m. de longueur, de 14 m. de surface, dont l'épaisseur de l'enveloppe soit de 25 mm., quand l'engin aura avancé de sa longueur il aura laissé un vide de 3,50 m^3. Si les mesures prises pour le boucher à mesure qu'il se produit sont inefficaces ou insuffisantes, il pourra fort bien arriver que par suite du facile glissement des terres sur l'acier le tassement final se localise en un seul point pour produire une excavation importante.

On a proposé divers remèdes sur lesquels nous reviendrons plus loin ; de tous, l'injection a paru donner les meilleurs résultats ; malheureusement dans les villes elle est d'un emploi difficile et reste pour ainsi dire sans effet ; ou bien le mortier se loge dans des fissures, dans des chambres qu'il va chercher parfois très loin, collecteurs voisins ou caves des riverains, ou bien il se creuse lui-même des poches où il s'accumule en refoulant le terrain autour de lui ; nous avons cité tel exemple où plus d'un mètre cube de ciment fut ainsi retrouvé concentré en un point.

D'ailleurs, même en pleine campagne, il n'est pas rare que les terres désagrégées par le frottement retombent sur le revêtement à mesure que la tôle échappe ; quelque soin qu'on apporte alors à son exécution, l'injection ne saurait empêcher les affaissements.

Avec des mineurs habiles et un boisage solide et bien ajusté, les anciennes méthodes donnaient sous ce rapport d'aussi bons résultats.

Refoulement du terrain. — Un des gros inconvénients du bouclier est de disloquer d'une façon très sensible les strates qu'il traverse ; l'adhérence des terres à l'enveloppe est telle qu'il y a

entraînement dans lé mouvement en avant; il n'y a donc pas glissement de l'acier contre la terre mais glissement d'une couche contre la voisine, ce qui n'est pas sans augmenter les efforts. On a fait sur ce sujet au cours des travaux du chemin de fer métropolitain de Paris des expériences concluantes ; une galerie ayant été ouverte sur l'axe de l'engin on trouva sur l'extrados des madriers et des coins de serrage que l'armature traînait avec elle depuis longtemps déjà. Il semble donc que le bouclier fonctionne moins simplement qu'on l'avait cru jusqu'ici ; quelle que soit la forme de sa trousse coupante, quelle que soit la régularité de la fouille qu'on creuse au préalable pour faciliter sa marche, il chemine en refoulant le terrain devant lui et par suite en provoquant des vides à l'arrière.

Si la charge verticale est assez forte pour empêcher le bourrelet de prendre un volume considérable, il arrive un moment où le couteau finit par passer au travers ; sinon le bourrelet, sans cesse croissant, atteint le sol, s'y déplace avec l'armature, et ce vallonnement qui constitue un obstacle sérieux à la circulation a été plus d'une fois observé à Paris ; il nous suffira de rappeler que dans les travaux de prolongement de la ligne d'Orléans au quai d'Orsay, la dénivellation atteignait de ce chef jusqu'à près d'un mètre de hauteur.

Dislocation des maçonneries. — La substitution du revêtement maçonné au revêtement métallique, autrefois en usage, permet de réaliser des économies notables ; en France, depuis la tentative de M. Chagnaud, on a donc presque toujours employé la pierre ou le béton de préférence à la fonte ou à l'acier, et c'est vraisemblablement ainsi que le bouclier continuera à fonctionner.

Il importe dès maintenant de signaler un grave danger auquel cette méthode expose : celui de partager le revêtement en anneaux n'ayant que peu ou point de liaison les uns avec les autres. Le mortier frais en effet n'offre aucune résistance à l'extension, pour peu que la queue d'un moellon trop saillant rencontre l'enveloppe, pour peu, et ceci est plus fréquent, que la queue s'affaisse soit sous la charge qu'elle supporte soit par le mouvement de galop de l'engin, il y a entraînement du dernier anneau clavé, au moment de

la course ; si la fissure est assez grande pour être visible, le mal n'est pas grand, une injection immédiate de mortier comblera la solution de continuité, mais si, très fine, elle échappe aux surveillants, la solidité de la voûte est compromise.

Une surveillance constante est donc indispensable, que les procédés ordinaires de percement ne nécessitent pas ; pourvu que les cintres soient robustes, la voûte forme toujours ici un ensemble homogène et résistant.

Difficultés de direction. — Cette surveillance continuelle est est encore plus utile et plus difficile en ce qui concerne le maintien de l'armature dans la bonne direction en plan et en profil. Quand on emploie des boisages, on peut se passer, au moins pour l'exécution de la galerie, d'une exactitude mathématique : on ne place avec beaucoup de soin que les deux premiers cadres ; ils servent à guider très suffisamment les mineurs dans la suite de leur travail ; c'est pendant l'abatage qu'on fait les vérifications et qu'on règle la section au gabarit voulu : si au moment même de maçonner on découvre des erreurs ou des fraudes, il est toujours aisé de les corriger, de relever le ciel ou de se déplacer à gauche ou à droite ; l'épaisseur du revêtement s'en trouvera augmentée en certains points : c'est un élément de sécurité de plus.

Il en est différemment avec le bouclier : le revêtement épouse de très près la forme de la fouille que l'armature lui creuse, aucune correction n'est possible qu'en diminuant l'épaisseur de la maçonnerie, ce qu'on ne saurait admettre. Quand il s'agit d'égouts, on peut ne pas s'astreindre à suivre rigoureusement le tracé, surtout en plan ; que la courbe exécutée soit d'un rayon plus petit ou plus grand que celle projetée, qu'un alignement droit se trouve brisé en deux ou trois tronçons obliques, cela n'a qu'une importance secondaire ; il est jusqu'à un certain point admissible d'économiser les frais d'une surveillance délicate et de se borner à un à peu près relatif ; mais quand le tunnel doit être affecté à la circulation des trains, il est de toute nécessité de respecter les rayons des courbes, les pentes et les rampes. Si l'engin dévie, on pourrait, il est vrai, corriger l'écart en maintenant la voie ferrée à sa position définitive, c'est-à-dire en la

désaxant par rapport à l'ouvrage : mais comme la section est par économie toujours exactement limitée au gabarit du matériel, celui-ci ne s'inscrit plus. Bûcher le revêtement serait s'exposer à des dangers très graves ; il n'y a pas d'autre ressource que de démolir la fraction mauvaise et de la reconstruire : à différentes reprises nous avons dans la première partie signalé la fréquence et la gravité de cet incident. On ne s'oppose à de telles erreurs que par une préoccupation constante de la direction, par des opérations répétées de vérification.

Nécessité d'un personnel spécial. — Du rapprochement des principaux défauts de la méthode résulte qu'on ne peut confier qu'à un personnel de choix le soin de manœuvrer le bouclier.

Il faut des mineurs consciencieux et habiles pour préparer convenablement la fouille, surveiller le front d'attaque, signaler et éviter les obstacles ; il faut des mécaniciens experts, des électriciens de profession pour conduire les dynamos, les pompes et les vérins ; il faut des maçons capables d'exécuter à temps un bourrage soigné ; il faut enfin des agents de surveillance instruits pour donner l'alignement, vérifier et rectifier la marche, prendre une décision prompte et judicieuse en cas de besoin.

C'est à cette condition seulement qu'on évitera les accidents et les déboires et qu'on assurera une exécution parfaite du travail.

Les procédés de boisages ordinaires étaient, convenons-en, d'un emploi plus aisé : de bons mineurs et de bons maçons suffisaient ; or il est toujours possible de réaliser sous ce double rapport un excellent recrutement ; il est beaucoup plus difficile de trouver des mécaniciens ayant le doigté nécessaire et surtout de former des agents auxquels on puisse confier la direction du chantier et laisser la responsabilité.

Avantages de la méthode. — Aux inconvénients sérieux que nous venons de résumer, il faut opposer de nombreux avantages pour la plupart d'un très grand poids.

Sécurité des ouvriers. — Le percement s'effectue dans des conditions de sécurité presque parfaites ; si l'engin a été étudié en vue

du travail auquel on le destine, s'il est bien approprié aux terrains qu'il doit traverser, on peut regarder l'ensemble du personnel comme à l'abri de tout danger.

Entièrement protégés par l'armature métallique, les mineurs n'ont à se préoccuper que du front d'attaque ; dans les terrains ébouleux il suffira d'excaver avec prudence, ou de blinder légèrement le talus des déblais pour n'avoir rien à craindre ; dans les terrains fluents une cloison percée de portes faciles à manier sera d'une efficacité certaine.

A l'arrière, sous la tôle de la queue, les maçons ne courent aucun risque, si disloqué que soit le terrain. Pendant les travaux de la Compagnie de l'Ouest, lors du percement du tunnel de Viroflay, on traversa des argiles qui, mouillées, se mirent en mouvement : de ce fait des pressions énormes se développèrent ; dans les parties exécutées sur bois, les blindages quoique doublés et même triplés, fléchirent et se brisèrent ; quant à l'armature, elle se faussa un peu, et offrit une résistance énorme à la propulsion ; mais jamais on ne signala d'accidents.

Emploi de l'air comprimé. — Lorsqu'il s'agit de passer sous une rivière, ou de franchir une nappe d'eau, le bouclier a sur les autres méthodes une supériorité incontestable ; souvent même il est le seul procédé qu'on puisse utiliser.

C'est pour le percement des souterrains en terrains aquifères qu'il fut imaginé par Brunel, puis presque exclusivement employé par la suite. Il se prête parfaitement à l'emploi de l'air comprimé : avec des dispositifs de sûreté judicieux et une étanchéité convenable du revêtement il donne d'excellents résultats. On a pu ainsi creuser à quelques mètres du fond des fleuves sans danger.

Suppression du boisage. — La suppression du boisage est d'une importance sur laquelle il convient d'insister.

D'abord il n'est pas certain qu'il en résulte une économie ; il faut en effet faire entrer en ligne de compte le prix de l'engin lui-même, frais d'acquisition et d'entretien ; si le tunnel à creuser est de faible longueur et si l'armature reste par la suite sans emploi

l'amortissement est élevé ; un engin qu'on paie 100 000 fr. par exemple et qui ne fonctionne que sur 100 m. (nous en avons vu des exemples) entraîne une dépense de 1 000 fr. par mètre : les boisages coûteraient à peine la moitié, peut-être même le tiers. Il y a donc là une question d'espèce, et l'économie ne peut être certifiée a priori en faveur du bouclier que si le bois coûte cher, ou si le souterrain est de grande longueur, un kilomètre par exemple.

Mais cette suppression du boisage a deux avantages certains : 1° elle diminue la section à excaver de toute l'épaisseur des blindages ; la surface de l'armature n'excède que peu la surface de la construction à y placer ; le petit espace resté libre peut être comblé avec du mortier qui concourt à la protection et à la résistance du revêtement ; 2° elle est une garantie de durée pour ce revêtement ; les bois en effet laissent toujours entre eux des vides qui constituent autant de drains, attirent et retiennent l'eau autour de l'extrados ; d'ailleurs, fussent-ils jointifs, ils finissent forcément par pourrir et par remplir ce rôle désastreux ; l'eau coule sur la surface extérieure de la maçonnerie, rencontre des points faibles, les attaque, les traverse et pénètre dans l'ouvrage.

Facilité et régularité du travail. — Il faut ajouter à cela que le travail du chantier débarrassé de toute entrave est plus facile et plus régulier ; l'abatage s'exécute en pleine masse, sur le front entier, avec une liberté plus grande de mouvements que lorsque des boisages gênants obligent à des reprises successives et partielles. De même, à l'arrière, les maçons exécutent aisément le revêtement dans un espace bien dégagé où l'approvisionnement en pierres et en mortier peut être continu.

Vitesse. — Ces multiples raisons font que la vitesse est généralement plus grande avec un bouclier qu'avec les anciennes méthodes. La rapidité d'avancement ne tient pas seulement à la nature des terrains, elle dépend beaucoup de l'ingéniosité et du soin apportés à l'organisation des différents services ; si les moyens d'évacuation des déblais sont énergiques, si l'équipe des maçons

ne retarde pas les mineurs, le parcours journalier de l'engin dépasse de beaucoup ce qu'on est en droit d'attendre du procédé par boisages. Nous ne citerons pas comme exemple le bouclier du collecteur de Clichy extra muros en raison de ce qu'il fonctionna suivant une méthode mixte de tous points condamnable ; mais nous rappellerons que la vitesse maxima du bouclier de la fraction intra-muros du même collecteur fut de 6 m., celle du bouclier de la Compagnie d'Orléans (Institut) de 6 m. également, et que les boucliers du lot en régie du chemin de fer métropolitain marchèrent à la vitesse uniforme de 4 m. par vingt-quatre heures.

Économie. — La question du prix de revient est complexe, nous en reparlerons à la fin de cette étude ; nous nous bornerons ici à dire qu'avec un engin bien conçu et bien dirigé et un parcours de quelques centaines de mètres, l'économie est toute en faveur du bouclier.

Conclusion. — Que conclure de ce parallèle entre les avantages et les inconvénients de la méthode ?

Ceci, qu'avant d'adopter le bouclier ou d'y renoncer il importe, dans chaque cas particulier, d'étudier de très près la question ; il faut tenir compte de la longueur et de la nature du tunnel, du temps dont on dispose, des terrains qu'il s'agit de fouiller, des facilités plus ou moins grandes qu'on a d'établir des puits et des accès, des obstacles qu'on risque de rencontrer, même du plus ou moins d'habileté des entrepreneurs qui exécuteront le travail.

Si l'ouvrage est très court, aucun doute n'est possible, le bouclier est inadmissible.

Si, pressé par le temps, on veut traverser vite un sol de consistance ordinaire, ni très fluent, ni très ébouleux, il faut creuser une galerie d'un bout à l'autre, puis y répartir de nombreux chantiers d'abatage et de maçonnerie qui marcheront à la rencontre les uns des autres : la multiplicité des puits de descente ou des galeries d'évacuation sera un élément de succès.

Si l'on a affaire à des sables fluents, ou à des terrains très mobiles et qu'en outre le délai de livraison soit assez éloigné pour

qu'une seule attaque suffise, on fera usage du bouclier qui donnera plus de régularité et plus de sécurité. S'il s'agit de couches aquifères, où l'air comprimé est indispensable, l'emploi du bouclier s'impose ; de même s'il faut traverser des vases molles qui à chaque instant risquent de venir remplir la chambre de travail.

Dans les villes il est encore plus difficile de fixer son choix : si l'épaisseur de terre sur la clef de l'ouvrage est faible, à moins que l'engin ne soit parfaitement équilibré et guidé, on s'expose à bouleverser la chaussée par des mouvements de galop ; si d'autre part on doit se heurter à des maçonneries, à des collecteurs, à des caves ou à des fosses, le rendement sera bien mauvais. Il vaut mieux alors revenir aux anciens procédés surtout s'il se trouve qu'on suit, comme cela arriva à Paris, un collecteur désaffecté qui peut faire, utilement et sans frais, office de galerie centrale.

Enfin pour employer le bouclier il faut, comme dans tous les travaux délicats, qu'on puisse compter sur un personnel sérieux et expérimenté ; le meilleur outil entre des mains malhabiles ne donne qu'un résultat médiocre. Il est telle circonstance, donc, où l'impossibilité de se fier à des agents ignorants ou incapables obligera à renoncer aux avantages de la méthode nouvelle.

La nature même de l'ouvrage à exécuter a son importance : pour un égout ou une conduite forcée, on ne s'astreint pas à suivre exactement le tracé, le bouclier y est d'un emploi commode, rapide et sûr ; mais pour un chemin de fer une précision mathématique s'impose, il faut un engin plus parfait et mieux surveillé : nouvelle cause d'hésitation.

CHAPITRE II

DE L'ENGIN

Différents types. — A première vue, les engins que nous avons décrits paraissent différer beaucoup les uns des autres ; en réalité, abstraction faite des nuances de détail, on peut tous les rattacher à deux types principaux ; si l'on prend en effet pour base de la classification le nombre des divisions, on partagera les armatures en deux groupes : celles qui sont pourvues d'une cloison verticale et celles qui ne le sont pas ; si, au contraire, on tient compte de la fraction de souterrain qu'elles servent à construire, on distinguera celles qui permettent de fouiller toute la section, et celles avec lesquelles on ne creuse que la partie correspondant à la calotte.

Terrains ébouleux ou fluents. — Dans les terrains très ébouleux ou humides et fluents, tels que des vases molles, il y a lieu de craindre des irruptions soudaines, aussi dangereuses pour l'ouvrage lui-même que pour les hommes ; en général, on exécute alors l'ensemble du revêtement d'un seul coup ; l'engin est partagé en deux chambres par une cloison verticale percée d'ouvertures qu'on peut fermer par des portes ; on le pousse en avant, la vase flue par les portes, on l'enlève dans le corps même à l'abri de l'enveloppe et du diaphragme ; c'est ainsi que fonctionnèrent à Melbourne plusieurs des boucliers dont nous avons parlé.

Si le terrain est plus consistant, ce qui se produit quand on a recours à l'air comprimé, on éloigne la cloison de la trousse coupante, la chambre de travail est plus longue ; on la fractionne en

compartiments pour localiser et diviser les attaques, les mineurs excavent dans chacun d'eux successivement : à ce type appartiennent quelques-uns des boucliers de Melbourne, ceux de Ripley (New-York), et celui du siphon de l'Oise.

Dans l'un et l'autre cas on peut ou non compléter l'engin par une visière ; elle n'est pas indispensable ; il semble pourtant qu'elle accroisse la sécurité et qu'elle facilite la pénétration malgré qu'elle augmente la surface frottante.

Terrains peu ébouleux ou durs. — Dans les terrains peu ébouleux, dans les terrains qui se tiennent sous un angle raide, comme l'argile sèche, les dispositions en usage sont autres ; généralement, on n'excave pas toute la section à la fois ; ceci permet de s'écarter de la forme circulaire ou elliptique qu'entraîne l'adoption d'un bouclier à pleine section, et de revenir au profil transversal ordinaire : radier concave, piédroits rectilignes, voûte supérieure ; c'est celle-ci seulement qu'on construit à l'abri de l'engin. Comme le danger d'éboulements est peu grand, on supprime la cloison antérieure et la division en compartiments du front d'attaque ; des planchers volants suspendus à l'enveloppe permettent d'exécuter la fouille : on perd moins d'espace, l'extraction et l'évacuation des déblais sont plus faciles.

On taille le front sous un talus aussi raide que possible ; une visière est indispensable cette fois pour protéger les mineurs ; sa longueur, et par suite celle de la chambre de travail, dépendront naturellement de la tenue des terres et de la hauteur de la section.

On achève plus tard le revêtement par des procédés appropriés : cette reprise en sous-œuvre s'effectue de la même façon qu'avec les méthodes connues de boisage, il n'y a pas lieu d'y insister.

En France, à part le bouclier du collecteur de Clichy *intra muros*, les engins mis en service dans de pareils terrains ne servaient qu'à exécuter la calotte ; tous étaient pourvus de visière et construits sans diaphragme vertical. Le bouclier du tunnel de Boston appartient également à ce type ; il était même plus dégagé que les autres puisqu'il se composait simplement d'un arc, sans plancher horizontal inférieur d'entretoisement.

Forme de l'armature. — L'armature épouse la forme d'extrados de la section qu'il s'agit de construire, soit totalement, soit partiellement.

Dans le premier cas la forme circulaire ou elliptique est générale ; nous ne pouvons citer que deux exceptions à cette règle : le souterrain exécuté à Anvers par M. Hersent en 1879 et le tunnel de la ligne Baltimore-Belt (1892).

S'il s'agit d'un égout comme le collecteur de Clichy, le siphon de l'Oise ou le réseau de Melbourne, la section circulaire est la meilleure puisque à égalité de périmètre elle donne le maximum de surface ; il est naturel de l'exécuter en une seule fois avec un engin cylindrique dont les conditions de résistance sont excellentes en raison de la symétrie des efforts ; cela évite les reprises en sous-œuvre, et les inconvénients et les sujétions qui en sont la conséquence ; il est vrai qu'on est ainsi conduit à employer un bouclier pesant et coûteux en raison de ses grandes dimensions ; la plus grande difficulté est peut-être la tendance continuelle à la rotation qu'offre un pareil outil. Dans les travaux de Clichy *intra muros* il fallait prendre de grandes précautions pour éviter ce mouvement, on n'y arrivait qu'en réglant constamment la surcharge symétrique du poids des pompes et des dynamos.

Dans le cas où le revêtement est métallique la forme circulaire offre deux autres avantages : elle permet d'employer des segments interchangeables dont la pose est facile et rapide, et de placer en découpe les joints horizontaux, ce qui augmente la résistance.

Mais si le souterrain est destiné au passage d'une voie ferrée, la forme circulaire est illogique, puisqu'il faut pour respecter le gabarit un excès de hauteur et de largeur, d'où des déblais inutiles. Elle a pourtant été employée très longtemps et continue encore à l'être à l'étranger. Les tunnels du Central-London-Railway sont circulaires.

En France, ce n'est qu'après la tentative de M. Chagnaud, en 1895, qu'on songea à utiliser le bouclier pour la construction des souterrains de chemins de fer ; mais très judicieusement on n'abandonna point la section classique ; on se borna à limiter le rôle de l'armature à l'exécution de la calotte et à faire un usage exclusif du revêtement maçonné. Les égoûts eux-mêmes furent

alors creusés d'après ces principes ; les trois boucliers du collecteur de Bièvre n'étaient que demi-circulaires, suivant l'exemple du bouclier du collecteur de Clichy *extra muros*. La stabilité de l'engin est plus grande, il n'y a plus de tendances à la rotation.

Les entrepreneurs, visant à l'originalité, se sont efforcés de varier les dispositions qu'ils adoptaient ; à la vérité, ils ont plutôt modifié les formes des poutres maîtresses supportant l'enveloppe que multiplié les types d'armatures ; que les piédroits aient été construits à l'avance, ou qu'ils fussent repris plus tard en sous-œuvre, que la section ouverte ait été réduite au minimum ou au contraire exagérée, tous les boucliers du Métropolitain, de la Compagnie de l'Ouest, de la Compagnie d'Orléans, du collecteur de Bièvre, et même de Boston, dérivaient du bouclier du collecteur de Clichy *extra muros*.

Enveloppe. Épaisseur. — Il n'est pas facile de fixer l'épaisseur qu'il convient de donner à l'enveloppe.

D'une part les efforts auxquels on doit résister sont extrêmement variables suivant la nature des terrains qu'on traverse, d'autre part en réduisant au minimum l'épaisseur de l'enveloppe on diminue le vide à combler par bourrage, ce qui n'est pas sans importance.

Le tableau ci-contre donne les épaisseurs des enveloppes des principaux boucliers que nous avons décrits.

Aucune conclusion ne s'en dégage ; les petits boucliers du collecteur de Bièvre avaient une enveloppe aussi épaisse que les boucliers Champigneul du Métropolitain parisien, cependant beaucoup plus longs et plus larges ; c'est que l'épaisseur par elle-même ne signifie rien, tout dépend des éléments de la résistance, à savoir : des poutres maîtresses, de leur forme, de leur distance, et des entretoises longitudinales, de leur nombre, de leur nature.

Tout ce qu'on peut dire, c'est que l'épaisseur variera de 12 à 30 mm. suivant le mode de construction ; il y aura lieu de tenir compte d'ailleurs des poussées que peuvent développer les terrains rencontrés ; il est bien évident qu'au tunnel de Viroflay les pressions exercées par l'argile en mouvement furent autrement

considérables que celles auxquelles étaient soumis les boucliers du Métropolitain fonctionnant sous 40 cm. de terre.

ENGINS	DIAMÈTRE	LONGUEUR	ÉPAISSEUR de l'enveloppe	NOMBRE DE TÔLES et observations
	m.	m.	mm.	
Clichy *extra muros*. . .	7,25	5,25	14	
Clichy *intra muros*. . .	7,278	7,27	14	
Siphon de l'Oise	2,630		14	18 mm. dans l'avant-bec.
Compagnie d'Orléans, bouclier Sully	10,60	6	24	2 tôles de 12.
Compagnie d'Orléans, bouclier Institut. . .	9,75	7,08	20	2 tôles de 20 dans la queue.
Collecteur de Bièvre, bouclier elliptique . .	4,92	5,48	18	2 tôles de 15 dans la queue.
Collecteur de Bièvre, bouclier circulaire Champigneul	4,92	5,48	18	2 tôles de 15 dans la queue.
Collecteur de Bièvre, bouclier circulaire Dioudonnat	4,96	4,07	14	2 tôles de 14 dans la queue.
Métropolitain, bouclier Champigneul	8,732	7,05	18	2 tôles de 18 dans la queue.
Métropolitain, bouclier Dioudonnat	8,648	6,75	24	2 tôles de 12.
Métropolitain, bouclier Weber	8,600	4,90	24	2 tôles de 12.
Métropolitain, bouclier Lamarre.	8,620	6	28	2 tôles de 14.
Compagnie de l'Ouest. bouclier de Viroflay.	10,554	8	30	2 tôles de 15.
Bouclier de Boston. . .	0,894	3,657	25	

On forme l'enveloppe soit de deux tôles en acier martelé d'égale épaisseur à joints recoupés, soit d'une seule tôle avec couvre-joint; ce deuxième système est évidemment le meilleur, son emploi est à recommander toutes les fois qu'on le peut; le premier exige un assemblage très précis; l'expérience a d'ailleurs prouvé que malgré ces précautions les deux tôles ne travaillent pas ensemble : on a vu l'une se briser sans que l'autre soit seulement faussée; en outre quand l'engin dans sa marche rencontre un obstacle, la rivure cède, les deux tôles s'ouvrent en éventail, désormais il se produit pendant les courses un travail d'arrachement du front qui absorbe une force relativement considérable et

l'excavation, ouverte sur une section trop grande, entraîne des éboulements. Dans la queue, le doublage des tôles n'offre pas les mêmes inconvénients, et comme dans cette partie il est très important de renforcer l'enveloppe en raison de son porte-à-faux, il vaut mieux employer deux tôles que changer l'échantillon de l'acier.

Il va sans dire que la surface extérieure doit être absolument lisse pour diminuer les frottements ; tous les rivets seront donc à tête fraisée sur l'extrados ; les couvre-joints dans le cas d'une tôle unique seront placés à l'intérieur : on aura soin de les répartir de façon que leur saillie ne soit pas une gêne pour la pose des entretoises et des consoles.

Eléments de la résistance. — L'enveloppe est raidie par des poutres maîtresses généralement au nombre de deux ; l'importance de ces poutres dépend évidemment des dimensions de l'engin, mais le calcul en est encore plus délicat que celui de l'enveloppe : si on leur donne trop de hauteur on encombre la section, on rend la circulation des agents et des déblais difficile, ce qui diminue le rendement, on accroît le poids total, ce qui exagère la dépense de premier établissement et l'effort à développer pour la propulsion ; si on les fait trop faibles, on risque de voir se produire des affaissements comme cela arriva au bouclier de Viroflay et à celui du collecteur de Clichy *intra-muros* qu'on dut entretoiser par des pièces de charpente verticales.

Il n'est pas aisé de prévoir les efforts qu'on aura à supporter ; même si l'épaisseur de terre est minime (c'est le cas des boucliers parisiens qui fonctionnèrent directement sous la chaussée), on ne connaît qu'approximativement la charge totale ; on ne saurait en effet limiter la masse des terres pesant sur l'armature aux plans verticaux qui l'enferment ; le poids à soutenir dépend de l'angle de glissement des terres sur elles-mêmes et de l'ébranlement qu'on leur communique, a fortiori est-il plus difficile encore de se faire une idée des efforts quand on traverse une montagne de 50 ou 100 m. d'élévation : assurément toute cette hauteur de terre ne portera pas sur l'engin, mais quelle limite se fixer ? Quand il s'agit du revêtement d'un souterrain, on part d'une pre-

mière épaisseur consacrée par la pratique; au cours du travail, suivant les résultats obtenus on l'augmente ou on la diminue; c'est ce qu'on a fait par exemple au tunnel de Viroflay. La même méthode n'est guère applicable à un bouclier : le renforcement des poutres n'est possible que dans des limites extrêmement faibles : aussi le bouclier de Viroflay a-t-il beaucoup souffert.

Il faut enfin tenir compte qu'il y aura à résister non pas seulement à des efforts verticaux mais encore à des poussées latérales souvent très fortes.

A Boston, les poutres en forme d'arc avaient été calculées pour une charge de 300 t., correspondant à une hauteur de terre de 4,10 m., on n'a pas signalé qu'elles aient été trop faibles.

Quelquefois la poutre avant et la poutre arrière ne sont pas identiques; on donne à celle-ci moins de hauteur qu'à celle-là pour ne pas la faire traverser par les vérins qu'on préfère suspendre à la semelle inférieure; c'est une disposition judicieuse : les ouvertures percées dans l'âme de la poutre réduisant sa résistance, il vaut mieux les éviter et diminuer d'autant la hauteur; on gagne ainsi en espace libre, les vérins étant moins encombrants. Dans le bouclier de Fontainebleau, toutefois, on était allé un peu loin dans cette voie en remplaçant la poutre arrière par un simple anneau d'acier fondu de 21 cm. de longueur et de 65 mm. d'épaisseur; il est problable que si elle avait fonctionné l'armature se serait déformée notablement.

Le tableau ci-après donne les hauteurs des poutres principales des divers boucliers étudiés.

Les hauteurs des poutres ont varié de 1,50 m. à 0,30 m.; ces dernières dimensions eu égard aux conditions d'emploi étaient excessives et préjudiciaient à un bon fonctionnement; on peut comparer entre eux les boucliers Champigneul et Dioudonnat du Métropolitain parisien, qui travaillèrent sensiblement dans les mêmes conditions : or les premiers ont effectué des parcours de 464,25 m., 710,12 m. et 399 m. sans se déformer aucunement; on en conclut que la hauteur de 0,30 m. eût été suffisante pour les poutres des boucliers Dioudonnat, d'autant plus qu'ils étaient moins longs et supportaient par suite un moindre effort.

ENGINS	DIAMÈTRE	LONGUEUR	HAUTEUR de la poutre avant		HAUTEUR de la poutre arrière		OBSERVATIONS
			en clef	aux naissances	en clef	aux naissances	
Clichy *extra muros*.	7,250	5.250	0.500	0,500	0,500	0,500	demi-elliptique
Clichy *intra muros*.	7.270	7,270	1,020	1,220	1,020	1,220	elliptique
Siphon de l'Oise	2,630	4,920	0,400	0,400	0,400	0.400	circulaire
Compagnie d'Orléans, bouclier Sully .	10.600	6,000	1,496	1,496	1,496	1,496	demi-elliptique
— — — Institut	9,750	7,080	0,560	0,560	0,560	0,560	— —
Collecteur de Bièvre, bouclier elliptique Champigneul	4,920	5,480	0,300	0,300	0,300	0,300	— —
Collecteur de Bièvre, bouclier circulaire Champigneul	4,920	5,480	0,300	0,300	0,300	0,300	demi-circulaire
Collecteur de Bièvre, bouclier circulaire Dioudonnat.	4,960	4,070	1,200	0,800	0,500	0,800	— —
Métropolitain parisien, bouclier Champigneul.	8,730	7,050	0,600	0,600	0,600	0,600	demi-elliptique
Métropolitain parisien, bouclier Dioudonnat	8,648	6,750	1,320	0,890	1,320	0,890	— —
Métropolitain parisien, bouclier Weber.	8,648	4,900	1,400	2,000	1.400	2,000	— —
— — bouclier Lamarre	8,648	6,000	1,400	0,900	0,715	0,900	demi-elliptique
Compagnie de l'Ouest, bouclier de Viroflay.	10,550	8,000	0,850	0,850	0,850	0,850	entretoises verticales demi-elliptique
Bouclier de Boston.	8,940	3,657	1,115	1,115	1,115	1,115	arc sans tirant horizontal

Forme des poutres. — Dans les boucliers demi-circulaires ou demi-elliptiques on a donné aux poutres des formes très diverses : les meilleures dispositions sont celles qui laissent libre la plus grande partie de la section. Les poutres des boucliers Dioudonnat n'avaient pas toute la largeur de l'armature, pour permettre de commencer la maçonnerie du revêtement dans le corps proprement dit; mais comme il fallait quand même soutenir l'enveloppe on les prolongea par des goussets formant consoles ; cet arrangement prête à la critique : d'une part le travail des maçons n'était pas aisé, de l'autre, l'évacuation des déblais se faisait par une ouverture relativement étroite : pour ces deux raisons on n'aurait pu réaliser un avancement rapide.

Les boucliers Lamarre étaient aussi encombrants; pourtant ils s'appuyaient sur les piédroits construits à l'avance et on ne maçonnait pas à leur intérieur. Au contraire, les boucliers Champigneul, largement dégagés, se prêtaient à une circulation active, quoiqu'ils fussent d'une hauteur totale moindre.

Mais c'est assurément le bouclier de Boston qui avec ses deux arcs simples et légers absorbe le moins de place.

Quand il s'agit de boucliers circulaires ou elliptiques, les poutres ont des formes beaucoup moins tourmentées : elles sont rivées à l'enveloppe dont elles épousent le profil ; on se borne à faire croître leur épaisseur comme il convient du diamètre vertical au diamètre horizontal.

Le tableau ci-dessous donne, pour les différents engins, le rapport de la section laissée libre à la section fouillée. Dans les travaux souterrains, il est d'autant plus important d'assurer aux hommes et au matériel une circulation facile qu'on veut progresser plus vite; en outre, comme l'espace disponible est par lui-même déjà peu considérable, il y a un intérêt majeur à l'utiliser du mieux possible; le pourcentage qui figure à la 4e colonne du tableau est donc un élément de comparaison intéressant; à ce point de vue spécial les boucliers Champigneul, celui de Clichy *extra muros*, et surtout celui de Boston, étaient judicieusement conçus.

Entretoises horizontales. — Dans les boucliers excavant la

section entière du tunnel, il n'y a pour ainsi dire pas d'entretoises horizontales ; au collecteur de Clichy *intra muros*, les divisions étaient de simples plates-formes destinées à supporter les pompes et la dynamo ou à permettre la circulation.

ENGINS	SECTION fouillée	SECTION libre pour la circulation et la machinerie	POURCENTAGE	OBSERVATIONS
	m²	m²	p. 100	
Clichy *extra muros*	20	13	0,65	Sans compter la surface prise par les planchers et la machinerie.
Clichy *intra muros*	37	15	0,40	
Siphon de l'Oise	5,50	2,5	0,50	
Compagnie d'Orléans, bouclier Sully	32	15	0,47	
Compagnie d'Orléans, bouclier Institut	28	20	0,70	
Collecteur de Bièvre, bouclier elliptique Champigneul	8	6	0,75	
Collecteur de Bièvre, bouclier circulaire Champigneul	9	6,7	0,72	
Collecteur de Bièvre, bouclier circulaire Dioudonnat	12	3	0,25	
Métropolitain parisien, bouclier Champigneul	26	15	0,58	
Métropolitain parisien, bouclier Dioudonnat	30	9	0,50	
Métropolitain parisien, bouclier Weber	29	9	0,50	
Métropolitain parisien, bouclier Lamarre	28	6,5	0,23	
Compagnie de l'Ouest, bouclier de Viroflay	30	17	0,56	
Bouclier de Boston	25	15	0,60	pas de plancher ni de machinerie

Au contraire, dans les boucliers demi-circulaires ou demi-elliptiques, on a toujours, sauf à Boston, réuni les pieds des poutres maîtresses par un tirant; on lie ces poutrelles par des longerons, et l'ensemble constitue un plancher qu'on recouvre de madriers et où se prolongent les voies de service. Ce plancher ne laisse pas que d'être embarrassant; comme son niveau est à une distance notable du fond de la fouille, il oblige à placer les voies d'accès sur une petite plate-forme ; au collecteur de Clichy *extra muros*, dès le début on réduisit sa hauteur à 0,52 m. Au tunnel de Viroflay on l'établit à mi-hauteur, partageant l'engin

en deux chambres de 1,20 et 1,65 m. de hauteur; à Boston on le supprima tout à fait, avec un plein succès.

Cette solution n'était pas applicable aux boucliers Dioudonnat et Lamarre, qui prenaient appui sur le sol par leur plancher même, mais il semble qu'on aurait pu l'imiter pour les boucliers Champigneul, qui glissaient sur les rails latéraux, et surtout pour les boucliers Weber et les boucliers de la Compagnie d'Orléans, qui s'appuyaient sur les piédroits construits à l'avance; on aurait accroché la machinerie sous l'enveloppe, toute la partie inférieure de l'armature eût été libre [1].

On peut craindre, il est vrai, que l'arc ne fléchisse un peu et ne réalise plus une fouille au gabarit convenable; si les piédroits servent au glissement, on pourrait éviter ce mouvement par des dispositions convenables des sabots, par exemple en les munissant de talons intérieurs portant contre les rails, solidement ancrés dans la maçonnerie; si l'appui se fait sur le sol, il faudrait augmenter la puissance des arcs, au besoin tenir compte de l'affaissement possible. D'ailleurs, dans les terrains trop mauvais comme à Viroflay, on conserverait le plancher d'entretoisement.

Entretoises verticales. — L'emploi d'entretoises verticales n'est pas à recommander, surtout avec des pressions moyennes; par elles-mêmes ces pièces prennent de la place, elles ont surtout le grave inconvénient de partager le bouclier en cellules où la circulation est malaisée; on gagne bien un peu sur la hauteur des poutres qui, ainsi contreventées, ont besoin d'une moindre résistance, mais on perd davantage pour la raison que nous venons de donner. On les a peu utilisées autrement que comme moyen de fortune pour consolider une armature disloquée. Seuls les boucliers Lamarre ont été conçus d'après ce principe ; ils ont donné de si mauvais résultats qu'on ne sera sans doute pas tenté de renouveler l'expérience; nous avons, en effet, signalé que les wagonnets ne purent passer dans les compartiments qu'après

(1) M. Champigneul avait, pour le métropolitain parisien, dressé un avant-projet de ce genre avec des arcs de 1 m. 30 de hauteur. Le bouclier aurait glissé sur le sol par l'intermédiaire de sabots et de rails; 4 wagons auraient trouvé place sur le front d'attaque auquel 4 voies ferrées auraient par suite abouti : l'évacuation des déblais eût été très rapide.

qu'on eut fait sauter quelques têtes de rivets en saillie; on comprend facilement quelles sujétions entraînait un pareil état de choses : nécessité de ne pas laisser déborder le chargement hors des caisses des wagonnets, obligation de ramener les wagons en arrière pour permettre l'accès de la chambre de travail, danger de coincement d'un agent entre le matériel et l'entretoise..... Même avec des wagonnets plus petits et des compartiments plus larges, la marge sera toujours trop faible pour être acceptable.

S'il y a lieu de diviser le bouclier en deux par un diaphragme vertical, cette cloison concourt tout naturellement à donner de la rigidité à l'ensemble : c'est le cas dans les terrains fluents, ou quand on recourt à l'air comprimé ; nous citerons en exemple le bouclier du siphon de l'Oise et les très nombreux boucliers du type Greathead employés à l'étranger. La cloison n'est qu'un élément de sécurité et, par suite, n'a de raison d'être que si les ouvertures dont elle est percée sont munies de portes facilement manœuvrables ; les ouvertures mêmes doivent être d'autant plus étroites que le terrain est plus dangereux; s'il y a plusieurs compartiments dans le front d'attaque, il en faut une au droit de chacun d'eux; c'est une gêne évidente pour l'évacuation des déblais, aussi ne s'y astreint-on qu'en cas de nécessité absolue, quand on craint que la vase, les sables ou l'eau, faisant irruption soudaine dans la chambre de travail, n'entraînent un désastre.

Divisions de l'engin. — Les poutres maîtresses partagent l'engin en trois parties : l'avant-bec, le corps et la queue; chacune doit être conçue en vue du rôle spécial qui lui incombe.

Avant-bec. — L'avant-bec s'étend de l'arête tranchante à la première poutre maîtresse ou à la cloison transversale quand il y en a une.

Le plus souvent il constitue la chambre de travail : c'est à son abri que les mineurs excavent le front d'attaque et préparent la course. Dans quelques cas exceptionnels, avec des terrains très fluents, par exemple, il est extrêmement court, au point qu'on ne peut y pénétrer; les vases descendent dans le corps même par

les ouvertures de la cloison ; c'est là que s'effectue le déblai : la cloison de quelques-uns des boucliers de Melbourne, que nous avons sommairement décrits, n'était qu'à 30 cm. de l'arête.

En général, on éloigne suffisamment la cloison pour qu'on puisse se mouvoir à l'aise dans l'avant-bec ; on le partage en cellules, si le terrain est très mauvais, par des diaphragmes verticaux et horizontaux qui divisent le front et localisent les effondrements ; il importe que ces compartiments aient des dimensions suffisantes pour que le travail y soit possible ; une hauteur de 1,60 m. à 1,80 m. est donc nécessaire ; sinon il vaut mieux reporter la cloison en avant, de façon que le mineur excave en se tenant derrière elle : ce sera le cas pour les égouts dont les dimensions sont toujours restreintes.

Avec l'air comprimé (siphon de l'Oise) la consistance du terrain est suffisante : on supprime les cellules. Enfin, avec les terrains secs peu ébouleux, on se libère même de la sujétion de la cloison : c'est ce qu'on a fait en France depuis Clichy. Dans ces deux derniers cas, on donne au front d'attaque un talus correspondant à peu près à l'angle de glissement : la tôle d'enveloppe est découpée en visière suivant une inclinaison convenable ; elle ne supporte que le ciel.

L'enveloppe est en porte à faux par rapport à la poutre avant, sa rigidité a été réalisée de différentes façons ; les boucliers Greathead étaient autrefois munis d'un lourd anneau de fonte ou d'acier ; aujourd'hui on fait un usage exclusif de consoles ayant à leur base la hauteur de la poutre à laquelle elles sont fixées, et formant en avant une trousse coupante plus ou moins aiguë ; ou bien elles sont en acier moulé comme au siphon de l'Oise, ou bien, et c'est le cas le plus fréquent, elles sont constituées d'une âme en tôle et de cornières. Leur nombre devrait être fonction de la longueur de l'avant-bec et des efforts probables ; en réalité il dépend des entretoises du corps en prolongement ou dans l'intervalle desquelles elles sont placées, c'est-à-dire du nombre des vérins ; on les limite à l'arête ou un peu en arrière, suivant qu'on veut pénétrer dans le front avec plus ou moins de facilité ; dans tous les cas, il est bon, si la tôle dépasse, de la raidir par une cornière ; les voilements sont fréquents à la rencontre du

moindre obstacle et difficiles à réparer sans ouvrir sur l'engin une chambre coûteuse.

S'il s'agit de terrains dans lesquels on force l'outil, il faut envelopper les consoles d'une deuxième tôle intérieure formant entonnoir : on évitera ainsi les coincements, on facilitera les glissements; cette disposition devient inutile si, comme il arrive souvent, on prépare à l'avance l'excavation que l'engin se borne à mettre au gabarit.

L'avant-bec a une longueur variable suivant les types; s'il ne sert pas de chambre de travail, on le réduit à presque rien; si à cause de la mobilité du sol, il est partagé en cellules, il faut lui donner des dimensions telles qu'un mineur puisse s'y loger et y manier ses outils; si le terrain qu'on traverse est sec, sa longueur dépend du talus naturel des déblais; il faut se garder cependant d'une visière trop aiguë, qui rend l'engin instable et facilite les mouvements de galop.

Aussi quelquefois, dans des sables fluents, par exemple, a-t-on divisé l'avant-bec par un plancher horizontal dans le seul but de briser le talus du front et de réduire sensiblement la longueur. Ces dispositions sont rares, dans presque tous les boucliers que nous avons décrits la chambre de travail n'était pas fractionnée; pour faciliter l'abatage, de petits planchers volants étaient seulement suspendus à l'enveloppe, à hauteur convenable.

Parfois, si le terrain est bon, on le fouille le plus possible en avant pour réduire la dépense de force au moment de la course; on protège alors les mineurs par des palplanches qui soutiennent le ciel et qu'on pousse entre l'enveloppe et une cornière parallèle; le bouclier, en progressant, fait rentrer les palplanches sous l'avant-bec et assure un abri définitif. Si au contraire le terrain est mauvais on recourt à un artifice analogue à celui du siphon de l'Oise : on soutient le front par un blindage buté contre la poutre avant et on ne creuse que par sections réduites.

Avec les boucliers à demi-section, il est bon de faire descendre l'enveloppe jusqu'au niveau du sol; dans le bouclier de l'Institut de la Compagnie d'Orléans, elle s'arrêtait à 0,60 m. au-dessus; il n'en est pas résulté d'accidents parce que les parois de la

tranchée se tenaient bien, mais dans tout autre cas une telle disposition est inadmissible.

Corps proprement dit. — Le corps proprement dit est compris, entre les deux poutres maîtresses ; par lui-même il n'a pas grande utilité et il semble qu'on devrait le réduire au strict minimum sinon le supprimer en vue de diminuer le poids et de faciliter le passage dans les courbes. Mais la plupart du temps c'est sur la seule longueur du corps que s'effectue l'appui sur le sol, par l'intermédiaire du plancher horizontal inférieur ; il n'est pas prudent, dans ces conditions, de le diminuer : l'instabilité des boucliers Dioudonnat, pour ne citer que cet exemple, était manifestement due à cette insuffisance d'appui ; d'ailleurs, il faut bien loger les vérins, les pompes de compression et leurs dynamos motrices, qui ne peuvent trouver place ni dans l'avant-bec, ni sous la queue ; le corps ne servirait-il qu'à cela, qu'il serait encore indispensable.

La tôle d'enveloppe sur la longueur du corps est raidie par des entretoises longitudinales limitées aux poutres principales et ayant la hauteur de celles-ci ; c'est entre ou sous elles qu'on fixe les vérins ; ces entretoises sont toujours constituées d'une âme et de cornières : on a abandonné l'emploi d'anneaux de fonte ou d'acier plus lourds et moins efficaces.

Queue. — C'est sous la queue qu'on exécute le revêtement métallique ou maçonné ; comme dans l'avant-bec, l'enveloppe y est en porte-à-faux : on la supporte par des consoles prenant appui sur la poutre arrière ; mais ces consoles ne peuvent venir jusqu'à l'arête, car la portion où se pose ou se maçonne le dernier anneau du revêtement doit être entièrement lisse ; par suite, cette partie est sujette aux avaries, elle s'affaisse très facilement ; or, ces accidents sont graves : ils empêchent de placer l'anneau métallique ou forcent à réduire l'épaisseur de la calotte, en vue de les prévenir et d'éviter des réparations onéreuses, on double très souvent l'épaisseur de la tôle sur toute la longueur de la queue ; tout au moins on l'augmente comme on fit à Boston, mais en se limitant au minimum indispensable pour ne pas

exagérer le vide annulaire qu'elle laisse en se retirant. Au bouclier de Fontainebleau on avait prolongé les nervures jusqu'à l'extrémité; nous avons vu que cette augmentation considérable du frottement, lors de la progression, ne fut pas sans influence sur l'échec complet de l'engin.

La longueur de la queue n'a pas toujours été judicieusement choisie; avec un revêtement de fer ou d'acier, pas d'hésitation : il faut et il suffit qu'on puisse commodément placer un ou deux anneaux; avec la maçonnerie, au contraire, plusieurs éléments contradictoires interviennent. La première idée fut d'imiter avec la pierre ce qu'on faisait avec le métal, c'est-à-dire d'exécuter la voûte par anneaux complets correspondant à la distance des cintres : on réduit ainsi au minimum la longueur de la queue, mais le chantier de maçonnerie est très resserré, on n'y loge qu'un personnel restreint, le travail est lent, il n'est pas possible de fournir un avancement rapide; les boucliers Weber construits d'après ce principe n'avaient que 1,80 m. de queue, ils auraient, certes, donné un mauvais rendement s'ils avaient fonctionné dans des conditions normales. En vingt-quatre heures les boucliers Lamarre ne pouvaient parcourir que 2 m. Il est préférable de loger trois cintres à l'arrière et de fractionner le chantier de maçonnerie en quatre échelons où le travail est simultané ; ce dispositif employé dans les boucliers Champigneul a permis de constamment suivre les mineurs. Il est logique, dans ce cas, de découper la queue en visière pour diminuer et le poids à mouvoir et la surface de frottement; mais l'inclinaison de la visière sur l'horizontale doit être plutôt trop forte que trop faible, car si pour une raison quelconque on augmente la longueur des courses, il ne faut pas que le terrain se découvre; c'est ce qui se produisit avec les boucliers Dioudonnat du 3e lot du Métropolitain parisien ; on dut, après coup, ajouter des tôles latérales de protection.

Si le terrain se tient bien, il est inutile et même nuisible de faire descendre l'enveloppe jusqu'au fond de la fouille; en bloquant directement la maçonnerie contre les parois, on évite les mouvements, plus sûrement qu'avec l'injection; dans presque tous les boucliers mis en service à Paris, on fut conduit à couper

les tôles à une certaine hauteur au-dessus des naissances, sans cette précaution les voûtes insuffisamment chargées sur les reins se fissuraient à la clef; à fortiori, dans les boucliers excavant à pleine section comme celui de Clichy *intra muros*, convient-il de limiter la queue à la partie susceptible de glisser.

Il n'y a jamais sous la queue d'autres planchers que les échafaudages volants nécessaires aux maçons; si ces échafaudages sont suspendus aux consoles, il faut les démonter chaque fois qu'on place un cintre, l'emploi d'une charpente légère liée à l'engin paraît sous ce rapport préférable : nous reviendrons plus loin sur les avantages de cette disposition.

Longueur totale. — Proportion des trois parties. — Il y a intérêt à réduire la longueur totale, somme de ces trois parties, l'avant-bec, le corps et la queue ; car, outre qu'on facilite le passage en courbe, on diminue non seulement les frais d'établissement, mais encore la surface flottante, c'est-à-dire la dépense d'exploitation. Les dimensions de la chambre de travail et de l'arrière-bec sont à peu près commandées par la facilité d'exécution de la fouille d'une part, de la maçonnerie de l'autre ; la longueur du corps seule prête à discussion. On pourrait presque le sacrifier dans les boucliers à pleine section et même dans ceux à demi-section. En reportant le poids de l'engin sur ses appuis au moyen de caissons longitudinaux, comme à Clichy *extra muros* et à l'Orléans-Sully, on logerait les vérins entre les consoles de l'avant-bec, au besoin on limiterait leur course au strict minimum acceptable ; mais ces poutres latérales sont très gênantes, et il faut bien un espace où installer les pompes et les dynamos. Si d'autre part le bouclier à demi-section s'appuie sur le sol par un plancher limité à la longueur du corps, il y a toujours lieu de craindre, comme nous allons le voir, que le bouclier oscille autour de sa base et prenne un mouvement de galop regrettable.

Il n'est donc pas possible de supprimer le corps et on ne s'est pas risqué à l'essai.

Le tableau ci-dessous donne les longueurs des boucliers décrits et la proportion des trois parties ; on voit que pour un même

ENGINS	LARGEUR	AVANT-BEC		CORPS		QUEUE		LONGUEUR totale.	OBSERVATIONS
		Longueur	p. 100 de la long. totale	Longueur	p. 100 de la long. totale	Longueur	p. 100 de la long. totale		
	m.	cm.		cm.		cm.		m.	
Clichy *extra muros*	7,258	210	40	140	26,5	175	33,5	5,25	demi-section
Clichy *intra muros*	7,278	255	34	132	26	295	40	7,27	pleine section
Siphon de l'Oise.	2,630	100	02	199,5	41	193,4	39	4,929	—
Compagnie d'Orléans-Sully.	1,060	240	40	200	33	160	27	6,00	demi-section
Compagnie Orléans-Institut.	9,750	250	35	164	24	294	41	7,08	—
Bièvre. Bouclier elliptique Champigneul	4,920	180	32,5	761	32,5	192	35	5,48	—
Bièvre. Bouclier circulaire Champigneul	4,920	191,5	35	165	30	191,5	35	5,48	—
Bièvre. Bouclier circulaire Dioudonnat.	4.960	130	32	144,5	35,5	132,5	32,5	4,07	—
Métropolitain parisien. Bouclier Champigneul. . . .	8,732	250	35	195	28	260	37	7,05	—
Métropolitain parisien. Bouclier Dioudonnat	8,648	225	33	150	22	300	44	6,75	—
Métropolitain parisien. Bouclier Weber.	8.648	180	37	150	30	100	33	4,90	—
Métropolitain parisien. Bouclier Lamarre	8,648	200	33	200	33	200	33	6,00	—
Compagnie de l'Ouest. Bouclier de Viroflay.	10,550	255	32	180	22,5	365	45,5	8,00	—
Bouclier de Boston	8,940	126	33	122	33	122	33	3,66	arc sans plancher

ouvrage la longueur totale varie dans d'assez fortes limites (4,90 m. à 7,05 m. pour le Métropolitain parisien). De tous ces engins celui de Boston est le plus petit (3,66 m.), quoiqu'il exécutât une voûte de près de 9 m. de portée ; au contraire, celui de l'Oise est relativement le plus long, une de ses dimensions étant presque double de l'autre ; tous les deux ayant bien fonctionné, il paraît difficile de conclure ; on peut dire cependant que le rapport de la longueur au diamètre est pour les plus grands ouvrages, comme les souterrains à deux voies, plus petit que l'unité, et qu'il croît quand la section diminue, ce qui est logique, mais en restant même pour les petits égouts, inférieur à deux.

Le bouclier de l'Oise mis à part, en raison de son fonctionnement à l'air comprimé, la longueur de l'avant-bec varie de 32 à 40 p. 100 ; celle du corps de 22 à 33 p. 100, celle de la queue de 27 à 45 p. 100. Cette proportion de 45 p. 100 est exagérée quand l'appui ne se fait que sur la longueur du corps et que cette longueur descend à 22 p. 100 ; il semble préférable dans ce cas de s'en tenir aux environs de 35 p. 100 pour la queue et de 30 p. 100 pour le corps ; mais si l'appui est suffisant, ces limites n'ont plus de raison d'être.

Hauteur totale. — Pour les boucliers à pleine section, la hauteur est celle de l'ouvrage à construire ; pour les boucliers à demi-section, elle reste arbitraire. La règle est de limiter l'emploi de l'armature à l'exécution de la calotte, mais on a souvent profité de l'abri réalisé par l'enveloppe pour agrandir les dimensions de la fouille et maçonner une portion des piédroits. C'est ainsi que tous les boucliers du Métropolitain parisien descendaient plus ou moins au-dessous du niveau des naissances ; on trouve à cela l'avantage d'augmenter la section disponible pour la circulation du personnel et l'évacuation des déblais ; mais il ne faut pas que ce bénéfice s'achète au prix d'une augmentation sensible du poids et de la surface frottante ; pour parer à ce dernier inconvénient, on a parfois descendu les poutres maîtresses d'une quantité notable sans étendre l'enveloppe, d'où les formes données aux boucliers Lamarre, Weber et Dioudonnat. Si les piédroits sont exécutés à l'avance, il n'y a pas à cela d'autre inconvénient que la

disposition et le poids encombrant des poutres ; mais si le terrain reste sans appui, pour peu qu'il se tienne mal, c'est un danger permanent.

D'autres fois, au contraire, comme à Viroflay, pour réduire le coût de l'outil, on réduit sa hauteur au minimum.

Une reprise en sous-œuvre est toujours nécessaire, il y a peu d'avantage à adopter des dispositions tourmentées pour augmenter le cube des déblais surtout si la section dont on dispose en se limitant aux environs du niveau des naissances est suffisante pour assurer le service.

Dans le tableau ci-dessous figurent les hauteurs totales des boucliers rapprochées des largeurs et longueurs et la quantité dont l'engin descendait au-dessous des naissances.

ENGINS	LARGEUR	LONGUEUR	HAUTEUR	PROFONDEUR en dessous des naissances.	OBSERVATIONS
Clichy *extra muros* . .	7,250	5,250	3,209		demi-section.
Clichy *intra muros* . .	7,278	7,270	5,920		pleine section.
Siphon de l'Oise . . .	2,630	4,920	2,630		—
Compagnie d'Orléans. bouclier Sully . . .	10,600	6,000	3,800	—0,70	demi-section.
Compagnie d'Orléans. Bouclier de l'Institut.	9,750	7,080	3,560	+0,20	—
Collecteur de Bièvre. B. elliptique Champigneul	4,920	5,480	2,000		—
Collecteur de Bièvre. B. circulaire Champigneul	4,920	5,480	2,300		—
Collecteur de Bièvre. B. circulaire Dioudonnat	4,960	4,070	3,200	+0,80	—
Métropolitain parisien. Bouclier Champigneul	8,732	7,050	3,381	+0,69	—
Métropolitain parisien. Bouclier Dioudonnat	8,648	6,750	3,900	+1,28	—
Métropolitain parisien. Bouclier Weber. . .	8,648	4,900	3,770	+1,15	—
Métropolitain parisien. BouclierLamarre . .	8,648	6,000	3,624	+1	—
Compagnie de l'Ouest. Bouclier de Viroflay.	10,550	8,000	3,995	—0,950	—
Bouclierde Boston. .	8,940	3,660	2,620		arc sans plancher

Boucliers transformables. — Il est d'autant plus difficile de

décrire une courbe que le bouclier est plus long et le rayon de l'arc plus petit ; or dans les égouts les rayons atteignent parfois des valeurs très faibles, par exemple quand il s'agit de passer, entre les fondations des maisons riveraines, d'une rue à une autre qui la coupe sous un angle aigu. Pour résoudre cette grosse difficulté on imagina le bouclier articulé ; on constitue l'enveloppe de trois ou quatre anneaux faisant corps en temps ordinaire, mais susceptibles, le cas échéant, de s'incliner en plan les uns par rapport aux autres. Le bouclier elliptique Champigneul du collecteur de Bièvre était ainsi construit ; malheureusement on n'osa pas le plier et l'on ne sait quels résultats il aurait donnés ; il est probable que l'armature aurait beaucoup perdu de sa rigidité et fort souffert au moment de la course, en raison de l'obliquité relative des trois parties ; il est préférable en pareil cas de raccourcir l'engin plutôt que de recourir à une complication onéreuse et d'une efficacité douteuse.

Au collecteur de Clichy intra-muros on a réussi à exécuter deux sections différentes avec un même bouclier convenablement modifié ; l'économie de ce procédé est évidente, l'exemple est donc à imiter ; mais il faut avoir prévu d'avance la transformation et étudié avec soin les éléments de l'armature, en vue surtout d'éviter les dislocations ultérieures.

Modes d'appui. — Les boucliers à pleine section glissent sur le sol : il n'y a pas à s'inquiéter de leur mode d'appui ; il en est autrement des boucliers à demi-section sous lesquels on interpose un organe spécial transmettant au fond de la fouille la charge des terres et le poids du métal.

Il y a quatre cas à considérer suivant que le bouclier glisse ou roule et qu'il porte sur le fond de la fouille ou sur les piédroits construits à l'avance.

Quand le bouclier repose directement sur le sol on peut répartir les efforts sur tout le plancher inférieur ou les limiter à des chemins latéraux ; le second dispositif a sur le premier deux avantages : la réduction de la surface frottante, la facilité du réglage, car de toutes façons on place sous l'armature un platelage ; or il est plus aisé de régler une file de pièces de charpente

qu'une plate-forme ; de plus, seul, il s'accommode de la progression par roulement. Celle-ci d'ailleurs n'est pas recommandable, le transport et surtout l'exacte mise en place de rouleaux pesants ne sont pas aisés, vu l'espace restreint dont on dispose, les fausses manœuvres sont fréquentes ; l'emploi de rails fixés sur des traverses et graissés paraît préférable.

L'exécution préalable des piédroits est moins onéreuse qu'elle le paraît ; il faut en effet pour établir une comparaison exacte tenir compte de deux avantages qu'elle procure : la facilité de direction de l'engin et surtout la commodité et la rapidité d'évacuation des déblais ; le plancher raccordant le bouclier au fond de la fouille devient inutile, et la main-d'œuvre de report de ce plancher est coûteuse : au 1er lot du Métropolitain parisien, 6 hommes étaient constamment occupés à ce travail ; leur suppression eût fait réaliser une économie de plus de 60 fr. par jour.

Sur les piédroits on peut, comme à l'Orléans, recourir aux rouleaux qui diminuent l'effort à faire pour produire la course ; mais la direction serait beaucoup mieux assurée, et les mouvements de lacet évités, avec des rails solidement ancrés dans la maçonnerie et des sabots à talon intérieur ; il est vrai qu'on a réussi à guider le bouclier par des galets latéraux roulant contre les parements, mais ces consoles sont encombrantes et pas toujours efficaces.

En ce qui concerne, non plus la nature, mais l'importance de l'appui, il convient de pécher plutôt par excès que par défaut. Si en effet on répartit l'effort, parfois considérable, sur une surface trop réduite, le terrain n'y résiste pas et cède : le bouclier s'enfonce ; mais surtout, si la longueur intéressée est trop faible, l'armature oscille autour de son support comme un fléau de balance autour de son couteau ; les terrains traversés sont plus ébranlés et disloqués à l'arrière qu'à l'avant, ils pèsent davantage sur la queue que sur l'avant-bec, l'engin a une continuelle tendance à lever le nez ; d'un côté il exagère la hauteur de la fouille et prépare les terrassements, de l'autre il écrase la maçonnerie fraîche sous son poids. C'était là le plus grand défaut des boucliers Dioudonnat du Métropolitain parisien, il fallut recourir à des moyens de fortune que nous avons décrits pour

empêcher cette inclinaison considérable de l'outil par rapport au tracé.

Le tableau ci-dessous donne pour les boucliers à demi-section la longueur suivant laquelle s'exerçait l'appui et son rapport à la longueur totale.

ENGINS	LONGUEUR totale.	LONGUEUR de l'appui.	RAPPORT de la longueur d'appui à la longueur totale.	NATURE de l'appui.
	m.	m.	m.	
Clichy *extra muros* .	5,25	3,30	0,63	Roulement sur le sol.
Compagnie d'Orléans. Bouclier Sully. . . .	6,00	4,00	0,66	Roulement sur les piédroits.
Compagnie d'Orléans. Bouclier Institut . .	7,08	2,80	0,40	Roulement sur les piédroits.
Collecteur de Bièvre. Bouclier elliptique Champigneul. . . .	5,48	2,50	0,46	Glissement sur rails latéraux.
Collecteur de Bièvre. Bouclier circulaire Champigneul. . . .	5,48	2,00	0,37	Glissement sur rails latéraux.
Collecteur de Bièvre. Bouclier circulaire Dioudonnat	4,07	1,50	0,37	Glissement sur le plancher inférieur.
Métropolitain parisien Bouclier Champigneul	7,05	2,00	0,28	Glissement sur rails latéraux.
Métropolitain parisien Bouclier Dioudonnat.	6,75	1,50	0,22	Glissement sur le plancher inférieur.
Métropolitain parisien Bouclier Weber. . .	4,90	1,50	0,30	Glissement sur les piédroits.
Métropolitain parisien Bouclier Lamarre. .	6,00	2,00	0,33	Glissement sur le plancher inférieur.
Compagnie de l'Ouest. Bouclier de Viroflay.	8,00	5 puis 3,10	0,62 puis 0,37	Glissement latéral sur le sol, puis sur les piédroits.
Bouclier de Boston. .	3,66	1,22	0,33	Glisssement sur les piédroits.

Ce rapport varie de 0,28 à 0,66 ; dès qu'il descend au-dessous de 30 p. 100 la stabilité n'est plus assurée : les mouvements de galop sont inévitables.

La crainte de voir l'effort par centimètre carré de surface d'appui dépasser les valeurs admissibles n'est pas chimérique ; le bouclier de Viroflay en est un exemple ; les pressions étaient telles qu'après plusieurs vains essais on se décida à construire les piédroits à l'avance pour supporter l'engin : malgré les pré-

Bien entendu, avec les hautes pressions, l'emploi de l'acier s'impose, même pour les tiges et les têtes d'appui : la fonte a donné lieu à des bris continuels, les réparations sont coûteuses et préjudiciables à la bonne marche du chantier.

Le tableau ci-contre donne pour les principaux boucliers les indications relatives au nombre et à la dimension des vérins, aux pressions maxima réalisables et aux pressions effectives de marche.

Vérins de rappel. — Les vérins du bouclier du collecteur de Clichy *extra muros* étaient à double effet, mais aux hautes pressions l'étanchéité est difficile à réaliser, d'ailleurs le piston n'est pas guidé sur une suffisante longueur ; il est préférable d'employer un piston plongeur ; pour le ramener à sa position initiale on se servait à Clichy *intra muros* d'une crémaillère et d'un pignon denté. Les inconvénients de cette disposition sont évidents, on l'abandonna pour recourir à de petites presses auxiliaires de rappel.

Le plus souvent ces petits vérins furent placés sur le côté des grands ; nous avons à plusieurs reprises insisté sur les résultats obtenus : dissymétrie des efforts, coincements et bris ; au tunnel de Viroflay, un même appareil de rappel servait pour deux presses : c'était rendre ces deux presses solidaires l'une de l'autre, ce qui en principe est mauvais. — Au tunnel de l'Yarra, à Melbourne, au contraire, chaque vérin était encadré par deux petits vérins de rappel diamétralement opposés : cette disposition est meilleure, mais il lui faut, croyons-nous, préférer celle des presses Champigneul : les 2 vérins sont logés à l'intérieur l'un de l'autre, leurs axes coïncident, la symétrie des efforts est parfaite ; à l'usage ils ont très bien résisté.

Machinerie. — Dans quelques installations d'importance secondaire l'eau comprimée était fournie par des pompes mues à bras et fixées au bouclier ; sans doute on réduit de cette façon les frais d'installation, mais s'il s'agit d'un petit bouclier la pompe est encombrante, s'il s'agit d'un grand, il faut beaucoup d'hommes pour la manœuvre : le personnel reste inutilisé en partie après

ENGINS	DIAMÈTRE	LONGUEUR	NOMBRE	DIAMÈTRE EN MM.	SURFACE EN CM²	COURSE	PRESSION D'EAU					OBSERVATIONS
							Par cm² en kgs.	Par vérin, en tonnes.	Totale pour le bouclier, en tonnes.	Effectivement réalisée		
										par cm² en kg.	Totale en T	
Collecteur de Clichy *extra muros*	7,250	5,25	6	240	455	m. 1,00	200	91	546	»	»	
Collectuer de Clichy, *intra muros*	7,278	7,27	8	240	455	0,60	200	91	1 016	22	176	
Siphon de l'Oise	2,630	4,92	10	150	177	0,50	220	39	495	80	180	
Compagnie d'Orléans. B. Sully	10,600	6,00	10	250	490	1,200	205	100	1 000	»	»	
			10	115	120	0,60	125	15	150	«	»	Tirage des poutres longitudinales.
Compagnie d'Orléans. B. Institut	9,750	7,08	8	240	455	1,30	250	114	900	80	275	
Coll. Bièvre. B. elliptique Champigneul.	4,920	5,48	6	170	227	1,03	150	34	200	36	50	
Coll. Bièvre. B. circulaire. Champigneul.	4,920	5,48	6	170	227	1,03	150	34	200	»	»	
Coll. Bièvre. B. circulaire Dioudonnat	4,960	4,07	5	160	200	1,00	200	40	200	200	200	
Métropolitain. parisien. B. Champigneul	8,732	7,05	8	240	455	1,00	250	114	900	80	275	
— Dioudonnat . .	8,648	6,75	8	220	380	0,900	260	100	800	»	»	
— Weber.	8,648	4,90	8	220	380	0,500	260	100	800	»	»	4 vérins seulement servaient.
			4	145	165	1,00	250	40	160			Compression du béton.
— Lamarre. . . .	8,648	6,00	9	190	285	1,02	400	114	1 000	»	»	
Compagnie de l'Ouest. B. de Viroflay.	10,550	8,00	12	250	500	1,50	350	218	2 620	50	375	
Bouclier de Boston . . .	8,940	3,66	10	152	182	0,88	210	37,5	375	85	130	

la course ; d'ailleurs un tel procédé est lent et n'est applicable qu'avec des dépressions moyennes.

Pour dégager la section il était naturel de reporter les pompes au dehors, où on peut facilement les commander à bras, à la vapeur, ou par l'électricité ; ainsi fit-on à Melbourne et à Boston ; l'eau comprimée est transmise au réservoir de distribution par des canalisations en fer ou en cuivre qui doivent être extensibles : on emploie donc des raccords flexibles en métal ou en cuir, ou des dispositifs télescopiques comme à Boston. Les fuites sont fréquentes et la canalisation finit, pour les grands parcours, par prendre une importance gênante ; au collecteur de Bièvre, la pompe n'était qu'à quelques mètres en arrière du bouclier Dioudonnat, auquel elle était reliée par un piston mobile dans un cylindre : à chaque course on reportait d'autant la machinerie en avant : d'où perte de temps et fausse manœuvre.

En général on profite du faible volume des moteurs électriques pour loger dans le bouclier même les pompes, les dynamo-motrices et le réservoir à eau. On peut placer cet ensemble sur le plancher inférieur au centre ou latéralement, ou le suspendre sous l'enveloppe, c'est une question d'espèce, la meilleure disposition est celle qui laisse le plus de place libre tout en permettant l'accès, la visite et l'entretien des organes ; si la hauteur de la section est suffisante, il pourra être avantageux de renvoyer la machinerie sous les entretoises, pour dégager le plancher au profit de la circulation du matériel.

Le réservoir d'eau est indispensable, non pas seulement pour alimenter les pompes, mais surtout pour recevoir l'eau usée : nous avons maintes fois signalé l'inconvénient qu'il y a à détremper le terrain sous le bouclier, surtout quand l'appui se fait directement sur le fond de la fouille.

Du revêtement. Revêtement métallique. — Avant de traiter la question de l'appui des vérins, il est plus logique de parler du revêtement puisque c'est lui qui, directement ou non, fournit la résistance nécessaire à la marche du bouclier.

Jusqu'à ces dernières années, le revêtement métallique était le seul en usage ; en France surtout, en raison de son coût élevé,

on lui a récemment substitué dans la plupart des cas la pierre et le béton, mais comme il est encore susceptible de nombreuses applications nous en dirons quelques mots.

Il doit être robuste, imperméable, facile à poser, c'est-à-dire n'exiger qu'une faible main-d'œuvre souterraine ; on le partage donc en anneaux, d'abord, puis en segments maniables, peu lourds, qu'on assemble les uns aux autres : à cet effet, chaque fragment est pourvu d'une nervure ou d'une cornière rivée ; on boulonne entre elles les nervures ou les cornières.

Les joints verticaux sont nécessairement continus ; en plaçant en file les joints horizontaux on réalise comme une ligne d'entretoises sur laquelle les vérins viennent prendre appui ; mais en leur donnant une découpe notable, on accroît la rigidité de l'ensemble et on évite les mouvements de torsion.

La longueur de l'anneau dépend de l'importance qu'on veut donner à la queue du bouclier et de la puissance des engins de transport et de montage dont on dispose.

A Melbourne, cette longueur varia de 12 pouces (0,304 m.) à 33 pouces (0,738 m.) ; celle de 12 pouces (0,304 m.) à 24 (0,608 m.) fut reconnue la plus pratique ; les longs anneaux ne sont pas économiques, ils diminuent le nombre des brides ou des cornières, et par suite le poids de métal (or ces éléments peuvent être disposés pour concourir efficacement à la résistance) et ils sont peu maniables.

Les joints longitudinaux sont très importants, il faut les dresser avec soin et surtout ajuster les croisements avec précision, en vue de prévenir les ruptures ou les infiltrations d'eau ; il n'est peut-être pas toujours bon de placer un joint dans le fond, sur l'axe ; car il est difficile de le bien exécuter s'il y a de l'eau et d'assurer soit l'étanchéité soit la prise parfaite du béton ultérieurement coulé.

L'étanchéité s'obtient de différentes façons : on interpose dans le joint des plaquettes de bois tendre, des bandes de feutre goudronné ou des couronnes de plomb ; le feutre a été employé au siphon de l'Oise et à Melbourne, il réalise une imperméabilité complète mais il est trop mince pour les joints non plans ou un peu ouverts : il convient donc mal pour les rectifications de tracé,

et pour les courbes ; le plomb est ici fort utile, malheureusement il est coûteux. Le bois en se gonflant donne une fermeture hermétique, mais il faut compter avec sa précarité. En Angleterre et en Amérique on a fait un usage très fréquent de joints à rainures dans lesquelles on coulait soit un ciment métallique spécial, soit un ciment ordinaire.

La difficulté d'exécution des joints horizontaux tient à la dissymétrie des efforts et aux déformations résultantes ; les chiffres que nous avons donnés à propos du tunnel de l'Yarra montrent qu'après la pose le diamètre vertical des anneaux est sensiblement plus petit que le diamètre horizontal ; les nervures portent l'une contre l'autre, non par leur talon mais par leur bord interne; on a souvent combattu cette tendance en chassant entre elles des coins de bois dur ; en recoupant les joints on réussit mieux à conserver une forme circulaire exacte.

La fonte est d'un emploi général ; on lui donne une épaisseur convenable, ainsi qu'aux nervures qu'on raccorde par un congé de grand rayon; à Melbourne la hauteur des nervures était en pouces de $2 + 1/3$ du diamètre en pieds des différents tunnels, l'épaisseur du métal de 1 pouce (0,0253 m.) pour 6 pieds (1,828 m.) de diamètre et 1/4 de pouce (0,063 m.) pour chaque pied (0,3047 m.) en sus. Dès qu'on arrive à des diamètres élevés, le poids, et par suite la dépense, deviennent considérables.

L'acier, d'une fabrication courante aujourd'hui, donnerait une économie notable ; mais avec l'épaisseur minime qu'il entraîne, les corrosions sont à craindre, surtout la forte réduction du diamètre vertical par rapport au diamètre horizontal serait un grave inconvénient ; au siphon de l'Oise on a résolu d'un coup la double difficulté ; un revêtement extérieur en ciment protège contre l'oxydation, un revêtement intérieur en béton assure la rigidité ; les conditions de travail du métal sont complètement changées, il travaille à l'extension, ce que n'aurait pu faire la fonte, et c'est la maçonnerie qui travaille à la compression sous la charge des terres ; l'acier n'a pas été seulement un élément de protection temporaire permettant l'exécution du béton, il joue encore un rôle actif pour résister à la pression intérieure.

Le montage des segments s'effectue à bras ou avec des appa-

reils spéciaux ; à Melbourne on trouva ces engins lents, lourds et embarrassants : on renonça à leur emploi ; de simples palans fixés sous l'enveloppe les remplacent avantageusement.

Dans les tunnels d'Europe et d'Amérique on se borna souvent à bétonner l'intérieur jusqu'à faire disparaître la saillie des nervures ; le béton n'est alors qu'un garnissage, le métal est le seul élément de la résistance : il serait plus prudent, semble-t-il, de le laisser à nu pour en rendre la visite et l'entretien faciles. A Melbourne, au contraire, le revêtement bétonné a une épaisseur telle qu'il puisse se suffire à lui-même : la dépense se trouve augmentée, sans profit, du prix du tubage devenu superflu. Le même reproche ne s'applique pas au siphon de l'Oise, véritable construction en béton armé, ou chaque élément travaille suivant sa nature.

Afin d'éviter les corrosions, il est nécessaire de mettre une chape extérieure : on y réussit simplement en bourrant le vide annulaire que laisse l'enveloppe en progressant ; quand on travaille dans l'air comprimé, la pression intérieure se charge en partie de cette opération.

Dans l'air comprimé, si le revêtement métallique est résistant par lui-même il faut n'effectuer le bétonnage qu'après l'achèvement complet de l'ouvrage, et cela pour reconnaître les fuites et les boucher ; si l'on bétonne immédiatement, on enferme de l'air qui, en s'échappant, lors de la décompression produira des soufflures et des décollements ; une bonne précaution contre ces accidents consiste à emprisonner dans la maçonnerie de petits tubes formant évents.

Le métal donne une étanchéité parfaite, il convient surtout à une forme circulaire : tous les segments sont identiques et interchangeables, la construction est rapide ; cet avantage disparaît si le profil de l'ouvrage est elliptique ou comporte des angles, il n'y a guère alors que de petits ouvrages, comme des aqueducs, qu'on continue à revêtir en fonte ou en fer.

Son emploi limite la fouille au strict minimum, mais devient extrêmement onéreux pour les grands diamètres.

Revêtement en bois. — Nous avons décrit un type de revête-

ment en bois qui, à Melbourne, fut substitué à la fonte avec une économie de 70 p. 100. Les cintres sont l'élément principal de la résistance en même temps qu'ils servent à l'appui des vérins ; les couchis leur transmettent tout le poids des terres : c'est une différence notable avec le métal où tout concourt à la solidité : enveloppe et nervures.

Ce système a de sérieux inconvénients : il y a un nombre extrêmement grand de joints, il est vrai que, le bois se gonflant, l'étanchéité est suffisante, et qu'on pourrait d'ailleurs calfater les joints ou plus simplement les couvrir de minces feuilles de tôle se chevauchant ; pour fournir aux vérins un point d'appui inébranlable, il faut fortement étrésillonner les cintres : les couchis qui les relient sont sous ce rapport d'une efficacité nulle ; en raison du volume du bois, les dimensions de l'excavation à réaliser augmentent : l'économie de montage qui résulte de la légèreté des anneaux ne compense pas l'accroissement de prix du bouclier et du travail de fouille; enfin, et c'est là le plus grave défaut, la durée du revêtement est fort limitée ; si on le double d'une maçonnerie, le bois pourrissant formera drain et attirera les eaux sur l'ouvrage dont les joints seront délavés.

Ce procédé ne paraît donc pas susceptible d'extension : on n'y recourra que dans des cas exceptionnels, dans les pays où le bois est à très bon marché et pour des travaux de minime importance.

Revêtement en maçonnerie. — Depuis 1895, l'emploi d'un revêtement maçonné exécuté directement sous la queue du bouclier s'est développé, surtout en France, d'une façon remarquable.

Les avantages de la méthode ne sont pas négligeables ; le prix de revient de la maçonnerie est très inférieur à celui du métal, d'autant plus que le diamètre du tunnel est plus grand ; même pour un égout circulaire de 6 pieds 3/4 (2,047 m.), à Melbourne on a pu descendre à 32 schellings (40 fr.) au lieu de 49 (61,25 fr.) par mètre courant. L'exécution est plus aisée et plus rapide en raison de la division des matériaux, de la suppression des manœuvres de force, de l'inutilité des monteurs encombrants et lents. La forme du profil transversal peut être quelconque et

revenir de la section circulaire acceptable pour les égouts, mais illogique pour les chemins de fer, aux dispositions classiques, exactement limitées à l'inscription du matériel dans le souterrain; enfin la maçonnerie seule permet de n'excaver sous le bouclier même que la partie de la section correspondant à la calotte et non tout l'ensemble. L'engin est ainsi plus léger, plus souple, plus maniable, plus résistant, moins onéreux ; les piédroits et le radier s'exécutent en sous-œuvre, sans danger, comme autrefois.

Mais la fouille est plus grande de l'épaisseur du revêtement, c'est-à-dire d'une quantité notable.

Au moment du décintrement les tassements de la voûte sont inévitables; quoique faibles par suite des petites portées, ils mettent le terrain supérieur en mouvement ; le métal, il est vrai, prête aussi à cette critique, puisque les anneaux, si résistants soient-ils, s'affaissent toujours.

L'étanchéité n'est pas absolue dans les terrains humides, quelque soin qu'on apporte à la confection des joints et de la chape, les filtrations sont fréquentes et dangereuses. Avec l'air comprimé il faut se borner aux faibles pressions ; avec 3 kg. de pression la perméabilité est énorme : au tunnel de l'Yarra on dut en de semblables conditions revenir au métal.

Le frottement de la queue du bouclier sur l'extrados du revêtement, sans inconvénient avec le métal, dont la surface est lisse, devient inadmissible avec une maçonnerie rugueuse et fraîche qui serait entraînée : d'où la nécessité de laisser un vide sensible sous la tôle, vide qu'il est difficile de bien bourrer et qui exagère les tassements.

Il faut enfin tenir compte de la fragilité : si le bouclier pèse un peu lourdement sur le dernier anneau exécuté il le disloque et l'écrase : c'est une grosse difficulté quand on veut faire monter l'engin suivant une pente forte.

En général, même avec les boucliers à pleine section, on ne maçonne pas le radier sur l'enveloppe : par suite de l'adhérence, il y aurait entraînement et dislocation, ou tout au moins fissuration, au moment de l'échappement de la tôle ; au collecteur de Clichy *intra muros* on le bloquait directement contre le sol. Il semble pourtant qu'à Melbourne on ait exécuté même la partie

basse de l'anneau dans le bouclier : mais nulle part nous n'avons pu trouver d'indication sur les artifices auxquels on recourut pour empêcher tout désordre.

Quand l'appui des vérins ne se fait pas sur la maçonnerie mais d'après des dispositifs que nous résumerons plus loin, on exécute le revêtement en matériaux naturels, meulière, moellons calcaires, ou quelquefois en briques. Si au contraire la maçonnerie constitue le point fixe de l'ensemble, on la compose de blocs artificiels séparés par des joints réguliers et fins; cette méthode employée aux travaux de la Compagnie de l'Ouest offre cet avantage qu'elle supprime le travail souterrain de taille et de retouche des pierres et se prête à un avancement rapide.

Revêtement en béton. — Le béton est d'un emploi difficile, car si on le comprime entre les cintres et la queue du bouclier, on développe un frottement tel que la progression est impossible ; il faudrait donc le pilonner, soit à l'arrière, à l'abri d'un boisage semblable à celui du collecteur de Clichy *extra muros*, soit sous une enveloppe distincte de l'armature comme au siphon de l'Oise. Le premier procédé n'est pas acceptable, l'avantage du bouclier étant précisément d'éviter la dépense élevée qu'entraînent les blindages; le second ne s'applique qu'à des ouvrages dont on exécute d'un seul coup la section ; par suite d'ailleurs de la présence du métal il constitue un béton armé auquel ce que nous allons dire de ce genre de revêtement reste applicable.

Dans quelques lots du Métropolitain parisien on chercha à bétonner non seulement le radier et les piédroits, mais aussi la voûte ; on se heurta à de telles difficultés, pour réaliser la perfection du clavage, qu'on préféra claver en meulière.

Si enfin, par des dispositifs convenables, on réussit à surmonter ces obstacles, il y a toujours à craindre que l'homogénéité ne soit pas complète ; nous avons en effet montré que, d'après le mode même d'exécution, la voûte est fractionnée en tranches d'épaisseur constante mal liées entre elles : ce grand nombre de surfaces parallèles de moindre résistance est un danger permanent, tout tassement sous le tunnel risquant de déterminer des ruptures et des tronçonnements.

Revêtement en béton armé. — Le béton armé, si fort à la mode aujourd'hui, apparaît au premier abord comme très séduisant ; en raison de sa faible épaisseur il diminuerait les dimensions de la fouille, celles de l'engin et le prix unitaire de revient ; il permettrait de rapprocher les vérins de l'enveloppe et de les faire travailler dans de meilleures conditions.

Mais l'exécution du béton armé est délicate, les sujétions qu'elle entraîne, avec une main-d'œuvre souterraine, deviendraient onéreuses ; pour éviter des reprises toujours défectueuses, on ne pourrait appliquer la méthode qu'aux boucliers fonctionnant à pleine section, c'est-à-dire aux petits ouvrages.

Certes, dans les conduites forcées, pour résister à l'effort d'extension, et assurer l'étanchéité, il est logique de faire intervenir les hautes qualités de résistance et d'imperméabilité du métal : le siphon de l'Oise est précisément économique parce que chacun des éléments qui le constituent travaille suivant sa nature ; mais pour les égouts à écoulement libre et surtout pour les chemins de fer, les efforts de compression prédominent, les avantages de la méthode sont déjà moins marqués.

A part le siphon de l'Oise, on ne peut pas citer d'ouvrage où l'essai ait été fait, et il est à craindre que d'ici longtemps on n'en voie pas d'exemple, tant cela semble difficile pour les souterrains de grande dimension. Le tunnel de Boston ne saurait nullement être envisagé comme une pareille tentative : les barres de fonte noyées dans la maçonnerie de briques n'avaient d'autre but que de fournir aux vérins l'appui nécessaire ; l'appoint qu'elles apportent à la résistance est discutable.

Appui des vérins. — Pour pousser l'armature en avant, il faut que les vérins prennent appui sur une résistance

Si le revêtement est métallique, les tiges terminées par de larges patins reportent sur lui toute la pression ; quand les joints horizontaux sont en ligne, c'est sur la nervure en face d'eux que les patins viennent s'appliquer. Si les joints sont en découpe, le contact se fait en un point quelconque de la tranche de l'anneau : il convient alors de donner à la nervure une importance telle qu'elle ne se brise pas sous l'effort.

Si le revêtement est maçonné, il peut encore servir d'appui : à Baltimore-Belt, les tiges des vérins s'engageaient dans des têtes carrées en fonte boulonnées sur une ferme en charpente qui répartissait les pressions ; au tunnel de Viroflay, des plaques métalliques, auxquelles s'articulaient deux à deux les vérins, jouaient le même rôle ; à Melbourne, pour éviter les bris de pierre, on remplissait les vides laissés par la découpe par des blocs d'attente. Ce système offre le grand avantage de rapprocher les vérins de l'enveloppe qui, par suite, fatigue moins, de supprimer les entretoises qui lient entre eux les cintres quand ils servent de butée ; il a pour inconvénient d'obliger à donner aux vérins une course plus longue, puisqu'il faut éloigner les têtes non seulement de l'anneau mais du dernier cintre posé, pour rendre possible le travail des maçons ; il est d'ailleurs très mauvais, nous l'avons déjà dit, de solidariser les vérins entre eux ; enfin on peut craindre que le revêtement se brise sous l'effort. Il faudrait donc accroître le nombre des presses en diminuant la force de chacune et augmenter la dimension des voussoirs, ce qui est une gène. La disposition de Boston est très ingénieuse, car elle a permis de profiter des avantages de l'appui direct sans s'exposer à ses dangers.

L'appui direct sur le béton n'est possible que s'il n'y a pas contact entre le revêtement et la tôle de la queue, sinon le frottement développé est si considérable que l'armature demeure inébranlable. Les multiples essais de Fontainebleau ont très nettement mis ce résultat en évidence : la pression de l'eau montant à 300 kg. par centimètre carré, le bouclier restait immobile et le revêtement se soulevait et cédait ; on espérait que le béton réaliserait un bourrage parfait, la compression l'obligeant à remplir le vide laissé par la tôle ; même ceci était une erreur, car au moment où la queue échappe, la prise est déjà trop avancée pour que toutes les excavations soient bouchées. Il est nécessaire d'enfermer le revêtement dans une enveloppe intérieure, comme on fit au siphon de l'Oise ; on profite alors de cet avantage que les presses produisent tout à la fois le pilonnage du béton et la propulsion.

Le plus souvent on a constitué la butée avec les cintres ; si le

poids de la maçonnerie et des terres suffit pour les charger, on se contente de les solidariser entre eux au moyen de pièces de fonte creuses placées en prolongement l'une de l'autre, au droit des axes des vérins ; on évitera d'interposer une poutre, comme on le fit au collecteur de Clichy *extra muros*, un tel dispositif n'ayant que des inconvénients.

Cette méthode a été fort employée au Métropolitain parisien et à la Compagnie d'Orléans ; outre qu'elle éloigne les vérins de l'enveloppe, ce qui développe des efforts de flexion dans les consoles et les étriers de support, elle expose à une dislocation de la voûte ; les butées se comprimant pendant la course, les cintres glissent sous les couchis puis reviennent à leur position d'équilibre quand les vérins rentrent dans leur logement, en entraînant cette fois et les couchis et l'anneau de maçonnerie fraiche ; à propos des deux boucliers de la Compagnie d'Orléans, nous avons donné des chiffres qui prouvent que ce mouvement n'est pas négligeable. Le seul moyen de s'y opposer fut de caler vigoureusement les couchis contre la poutre arrière du bouclier ; dans leur mouvement de retour, les cintres se déplacèrent seuls.

Cette autre remarque n'est pas moins importante : pendant la propulsion, la tête du vérin s'incruste plus ou moins profondément dans la masse du cintre ; au retour, celui-ci reste un instant suspendu à la tige et contribue à la fausser ; en interposant entre les deux surfaces en contact un calage intermédiaire de grande section, le cintre et la tête du vérin restent absolument indépendants l'un de l'autre.

Avec le bouclier Lamarre on avait substitué le bois au fer ; cet exemple n'est pas à imiter : les cintres en charpente sont trop encombrants, trop déformables.

Si on veut réduire le nombre des cintres intéressés à la résistance, ou si on craint que la charge qui les maintient soit insuffisante, on ancre les cintres dans la maçonnerie ainsi qu'on fit au collecteur de Clichy *intra muros*.

La seule précaution est d'attendre qu'un anneau soit pris avant de l'introduire dans la chaîne. Il faut craindre la fatigue de la maçonnerie, la déformation des cintres si les attaches travaillent inégalement, et compter avec les sujétions de main-d'œuvre et de

surveillance qu'entraîne cette multitude de crampons et de colliers.

Les essais qu'on a tentés pour prendre appui sur une charpente indépendante des cintres n'ont pas été couronnés de succès; *a priori* la méthode était séduisante, puisqu'elle supprimait les fissurations et les décollements d'anneaux, mais à la pratique on lui reconnut des inconvénients nombreux que ne compensait pas cet avantage unique; les charpentes Dioudonnat, par exemple, étaient lourdes, coûteuses, encombrantes; malgré le soin apporté à l'assemblage des différentes fermes elles se comprimaient, reculaient, se disloquaient : il fallait du temps et un personnel exercé pour transporter et monter en tête le dernier élément de queue, et surtout les entretoises, les écharpes, les chandelles de butée à l'arrière étaient une gêne énorme. D'ailleurs pour tirer du procédé tout le bénéfice désirable, il est nécessaire de ne pas profiter de la charpente pour y appuyer les cintres qui doivent se suffire à eux-mêmes, d'où une augmentation de dépense, par doublement du matériel.

Dans quelques cas, la charpente ne servait qu'à reporter l'effort sur la maçonnerie, soit par l'ancrage de chaque ferme, soit par un ancrage unique à l'arrière ; ce dernier dispositif est mauvais, le report périodique de la butée arrêtant tout le chantier ; le premier ne vaut guère mieux, par l'impossibilité où l'on est d'intéresser à la résistance la maçonnerie fraîche.

Au collecteur de Bièvre, les boucliers Champigneul ne prenaient appui ni sur les cintres ni sur la maçonnerie, mais sur les couchis par l'intermédiaire d'un faux cintre. Le sapin ayant une adhérence énorme avec le mortier de l'intrados, la surface de frottement était considérable, d'où une fixité de la butée plus réelle qu'avec les autres méthodes. La poutre qui sert à répartir les pressions est encombrante et fragile ; il est d'ailleurs probable que les couchis, en vertu de leur élasticité propre, se compriment puis reviennent à leur position primitive, c'est-à-dire fissurent le revêtement ; ici les mouvements furent si faibles, qu'on ne les perçut point, mais avec de hautes pressions, on verrait peut-être les couchis flamber dans l'intervalle des cintres.

Cintres, entretoises et couchis. — Le plus souvent, donc, les cintres ont un double rôle à remplir : supporter la charge de la voûte et fournir la butée des vérins.

Les cintres en bois ne satisfont que difficilement à la seconde condition; quoique légers, ils sont si encombrants et si déformables qu'on renonce d'ordinaire à leur emploi.

ENGINS	NOMBRE des cintres.	NATURE	ESPACEMENT	LONGUEUR intéressée.	OBSERVATIONS
			m.	m.	
Clichy *extra muros*	30	en fer.	1	30	
— *intra muros*	30	—	0,60	18	Ancrés.
Siphon de l'Oise.	10	en tôle	continus	5	Anneaux de 0m,50 en tôle, continus.
Compag. d'Orléans. B. Sully.	40	en fer.	1,10	44	Butonnés.
— B. Institut.	40	—	1,20	48	—
Coll. de Bièvre. B. Elliptique. Champigneul	20	en bois	1	20	Réunis par des tirants en fer.
Coll. de Bièvre. B. circulaire. Champigneul	20	—	1	20	Id.
Coll. de Bièvre. B. circulaire. Dioudonnat	15	en fer.	1	15	Indépendants de la ferme d'appui des vérins.
Métropolitain parisien B . Champigneul . . .	30	—	1	30	Butonnés ou non.
— B. Dioudonnat. .	20	—	1,80	36	Portés par la ferme d'appui
— B. Weber	20	—	1	20	Id.
— B. Lamarre . . .	20	en bois	1	20	(primitivement, cintre mobile lié au bouclier).
Compagnie de l'Ouest. B. de Viroflay.	»	—	1,50	»	
Bouclier de Boston.	»	—	0,80	»	7 viroles de 1m fixées au bouclier.
Bouclier de Fontainebleau .	7	en tôle	continu	7	

Les cintres en fer sont plus répandus ; faut-il les alourdir ou les alléger ? Si leur poids est élevé, les manœuvres sont lentes ; une équipe nombreuse s'y emploie, qui reste après le montage partiellement inutilisée. S'ils sont insuffisamment résistants, au contraire, on les butonne : ces supports sont un obstacle à la circulation.

Quand ils ne portent que la voûte on les constitue d'un fer en U, à l'intérieur duquel on rive un deuxième fer en U ou un fer à T ; quand ils doivent résister à la poussée des vérins, on leur donne plus de hauteur en les formant de cornières et d'une âme pleine ou évidée.

On les entretoise par des pièces de fonte retenues par des chevilles et portant sur des sommiers plus larges.

Si on augmente l'espacement, les manœuvres de démontage de report et de réglage sont moins nombreuses, mais toutes les pièces sont plus lourdes : les cintres et les butées intermédiaires d'abord, puis les vérins qui fournissent une course plus longue ; puis la queue qui doit couvrir tout l'anneau à exécuter ; puis l'engin lui-même, pour garder les proportions convenables ; d'où un accroissement de prix, et dans l'établissement et dans les manutentions. Au contraire, avec des cintres rapprochés, les vérins n'auront qu'une faible course; l'engin sera ramassé et maniable, l'abatage en tête aisé ; mais les opérations de report seront fréquentes, les cintres nombreux ; il y a donc un balancement à faire dans chaque cas particulier entre ces avantages et ces inconvénients.

Ce qui importe surtout, c'est de créer des chantiers suffisamment dégagés et accessibles pour qu'un travail rapide y soit assuré ; si les maçons, par exemple, retardent les mineurs, ou inversement, l'organisation est défectueuse.

On a quelquefois cherché à supprimer la manœuvre du report des cintres en profitant de la progression du bouclier lui-même ; ceci n'est possible que si l'appui s'effectue directement sur le revêtement bétonné ou maçonné ; on constitue le cintre d'une enveloppe métallique continue et on le lie invariablement à l'engin. Cette complication ne donne que de mauvais résultats, la surface de frottement se trouve ainsi augmentée d'une quantité notable, les presses développent un effort plus élevé qui fatigue tout l'ensemble ; quelque ingénieux et robuste que soit le dispositif d'attache, il finit toujours par se briser ; surtout, et ceci est très grave, pour ne pas décintrer trop tôt la voûte, on est obligé de donner au cintre une longueur telle que son emploi devient impossible. Les quelques essais tentés dans ce sens n'ont fait que confirmer ces raisonnements ; au tunnel de Viroflay on préféra revenir aux cintres indépendants ; à Fontainebleau, l'échec fut complet.

Les couchis n'offrent rien de spécial ; ils peuvent rester ce qu'ils sont dans les constructions aériennes.

Nous nous bornerons à rappeler les services rendus par les panneaux en planches du collecteur de Clichy, *intra muros*, ou du souterrain de l'Orléans (chantier de l'Institut) ; on les place non pas parallèlement, mais perpendiculairement à l'axe ; ils donnent un dégrossissage appréciable de l'intrados exécuté à bain de mortier et permettent au maçon de travailler face à l'anneau précédent et non face aux reins.

CHAPITRE III

UTILISATION DE L'ENGIN

Exécution de la fouille. — Les différentes façons dont on conduit l'exécution de la fouille se ramènent à quatre types principaux.

Première méthode. — La première méthode est celle que les Anglais et les Américains ont appelée « the assisted shield method ». Elle consiste à précéder l'engin par une galerie blindée plus ou moins haute et large suivant les cas; le terrain est excavé et boisé jusqu'à une petite distance du front, la partie avant du boisage reposant sur les cadres, la partie arrière sur l'enveloppe elle-même ; au tunnel sous la Yarra à Spottiswoode, au Central London Railway, à Boston, on a procédé ainsi ; à Londres, avec les petits boucliers la galerie s'avançait de deux mètres en moyenne, à Boston on ne dépassait guère la longueur d'une course, soit 0,80 m.

Quel rôle joue alors le bouclier ? Quel bénéfice en tire-t-on ? Il est difficile de répondre. Le bouclier a justement pour but d'éviter les frais d'acquisition des blindages et les pertes de temps qu'ils entraînent. Il est illogique de faire appel à la fois à deux procédés qui s'excluent l'un l'autre. En cas d'accident, dira-t-on, les ouvriers trouvent sous l'enveloppe un abri certain ; d'abord il n'est pas sûr qu'ils pourraient assez tôt se replier en arrière, et puis combien le rôle du bouclier est amoindri si on se borne à en faire un dispositif de sécurité utilisé seulement dans des cas exceptionnels !

Deuxième méthode. — Dans la deuxième méthode on prépare la fouille à l'avant sur la longueur d'une course, sans boisages

ou à l'abri de boisages légers et accidentels ; c'est ainsi qu'on a souvent opéré en France dans les terrains peu ébouleux et secs ; des palplanches mobiles soutenaient suffisamment le ciel jusqu'au moment où le bouclier venait assurer une protection définitive.

Il est sage de fractionner les courses, de ne pas s'aventurer trop loin, d'adoucir au maximum le talus du front d'attaque. Sous les chaussées des villes, la continuité de la circulation ébranle les terres et les met aisément en mouvement ; en pleine campagne, un changement brusque de terrain, la rencontre inopinée d'un plan de glissement sont des événements possibles, trop souvent suivis d'accidents regrettables ; ainsi la sécurité est relative et trompeuse, une grande prudence est nécessaire. Si le terrain prend naturellement un talus si incliné que la longueur à donner de ce chef à l'avant-bec soit inadmissible, ce qui peut se produire avec des sables fins boulants, ou si, dans l'air comprimé, on veut raidir le front de taille pour éviter des pertes d'air trop abondantes, on divise la chambre de travail en deux compartiments par une cloison horizontale, ou on se protège par un blindage comme on fit au siphon de l'Oise ; en opérant sur des sections réduites, les filtrations d'air sont limitées et les invasions d'eau et de déblai peu considérables.

Troisième méthode. — La troisième méthode s'applique aux terrains mous et fluents comme des vases. On pousse l'engin dans la masse qui pénètre dans le corps au travers des ouvertures du diaphragme vertical s'il y en a un, ou directement s'il n'y en a pas. C'est dans la partie centrale du bouclier qu'on reprend les déblais pour les charger en wagon et les évacuer ; ce procédé fut maintes fois employé à Melbourne, à Boston on y recourut sur une longueur de 30 m. pour traverser des sables humides.

Quelquefois par suite de la proximité de la cloison et de l'arête du couteau, l'excavation s'exécute de l'intérieur, il est bien difficile alors de la limiter aux dimensions exactes de l'armature ; elle s'étend au delà, irrégulièrement ; des tassements dans tous les sens en résultent ; c'est un procédé trop dangereux pour être recommandable.

Quatrième méthode. — La dernière méthode est la plus usuelle,

en France du moins ; elle consiste à préparer seulement le chemin du bouclier en creusant en avant une série de fouilles voisines sur une section totale plus étroite que la section définitive ; dans sa marche l'engin dresse l'excavation et fait tomber les terres intérieures ; on utilise ainsi la puissance pénétrante du couteau en réduisant au minimum l'effort demandé aux vérins. L'épaisseur de la couronne qu'on laisse dépend de la nature du terrain et de la difficulté qu'éprouvera la trousse coupante à y pénétrer ; en général elle est de 30 cm.

Quand la hauteur de la section l'exige on suspend sous l'enveloppe de petits planchers volants où se tiennent les mineurs ; suivant les cas, on taille le front à ces deux étages simultanément par deux chantiers indépendants, ou successivement avec une seule équipe : le premier mode est plus rapide que le second, mais plus délicat d'emploi.

Évacuation des déblais du front d'attaque. — Le service d'évacuation des déblais doit être étudié et organisé avec un soin jaloux, car c'est de lui que dépend en grande partie le succès de l'opération, au moins en ce qui concerne la rapidité de la marche et l'économie finale.

Il importe d'abord que le service d'évacuation et celui d'approvisionnement soient distincts et indépendants l'un de l'autre et que les wagonnets aient un accès facile jusqu'au front de taille : à cet égard le dispositif très simple employé soit au premier lot (Reuilly) du Métropolitain parisien, soit au tunnel de Viroflay, est excellent ; les wagonnets vides arrivaient par une voie latérale, se retournaient parallèlement au front et après chargement repartaient sur une seconde voie latérale, tandis que l'approche des matériaux s'effectuait par le centre ; il faut proscrire, absolument, cette organisation défectueuse où des déblais amoncelés sur le plancher sont repris et jetés dans les wagonnets restés en dehors de l'engin.

Pour être constamment maintenu au niveau des poutrelles inférieures du bouclier, le plancher qui porte les voies doit être démonté de temps en temps et reporté en avant ; cette manœuvre exigeait 6 hommes au Métropolitain parisien et revenait journel-

lement à 80 fr. ; on considéra qu'il ne serait pas plus coûteux de faire précéder l'engin d'une galerie centrale inférieure dont on tirerait un double avantage : la reconnaissance préalable du terrain et un moyen rapide d'évacuation des déblais ; il suffirait en effet d'engager une rame de wagons dans la cunette pour qu'on y pût jeter directement les terres par le moyen de trémies ; ce fut la disposition du chantier de Vincennes dont nous avons signalé le bon fonctionnement.

Quand on a construit d'avance les piédroits, il est naturel d'utiliser les galeries latérales pour l'enlèvement des terres, ainsi qu'on fit avec le bouclier Sully de la Compagnie d'Orléans ; tout l'étage supérieur reste libre pour l'approvisionnement ; les opérations de montage et de réglage des cintres sont aisées, puisqu'on n'est plus gêné par une circulation intense.

Enfin, dans quelques cas particuliers, on peut être conduit à adopter cette solution rare, mais excellente, d'une évacuation par l'avant ; les chantiers de la rue de Rivoli (Métropolitain parisien) et de l'Institut (Cie d'Orléans) étaient ainsi disposés, pour profiter de l'existence d'anciens collecteurs désaffectés. A vrai dire ce ne sont là que des exceptions, car percer une telle galerie jusqu'à l'extrémité finale serait long, coûteux et se concilierait peu avec l'emploi d'un bouclier.

Évacuation à l'arrière. — Pour faciliter l'évacuation à l'arrière on dégage la section le plus possible ; à cet égard la multiplicité des cintres métalliques peut être une entrave, surtout s'ils sont butonnés ; quant aux charpentes en bois, leur inconvénient saute aux yeux.

On conduit les terres soit à des monte-charges voisins, soit à des galeries de décharge, soit simplement à l'arrière ; le transport dans la partie achevée peut être rapide puisque les convois n'y rencontrent plus d'obstacles.

La traction se fera par des hommes si le cube est faible, par des chevaux s'il est plus considérable et mieux soit par des locomotives à air comprimé, soit par des tracteurs électriques. Ne pas étudier et combiner minutieusement à l'avance tous ces éléments, c'est se réserver des surprises désagréables ; l'arrêt intempestif

d'un seul engin paralyse tout un chantier et entraîne des frais considérables. Nous n'insisterons pas davantage sur la concordance qui doit exister entre tous les moyens d'évacuation d'une même entreprise : tracteurs, monte-charges..... les détails que nous avons donnés à propos des meilleures installations suffisent.

Rappelons seulement que dans les petites sections, l'emploi de transporteurs électriques a rendu de très grands services, au collecteur de Clichy *intra muros* surtout on réalisa ainsi une indépendance absolue entre les deux chantiers de terrassement et de maçonnerie.

Direction en plan et en profil. — De multiples causes interviennent pour faire dévier l'engin soit en plan, soit en profil ; rencontre d'un obstacle sous le couteau, dissymétrie des pressions exercées par le terrain, tassement des appuis, mauvais réglage des chemins ou instabilité propre de l'armature, il est indispensable qu'une surveillance éclairée et constante s'exerce, sans quoi l'écart de direction s'accroît rapidement.

Dans la construction des égouts, nous l'avons déjà dit, l'inconvénient est peu considérable, au moins pour les sinuosités en plan, mais quand il s'agit de chemins de fer la moindre différence est grave ; si on veut brusquement ramener le bouclier à sa position normale on développe des réactions violentes qui le disloquent ; si la déviation est notable et se prolonge, on n'a d'autre ressource que de démolir la portion exécutée.

Donc, et plus encore en courbe qu'en ligne droite, il faut multiplier les opérations de précision servant de base à l'alignement et au nivellement et n'en confier le soin qu'à des agents consciencieux et habiles. Pas mal de déboires et d'insuccès ont fait incriminer la méthode même, qui n'étaient dus qu'à l'incapacité du personnel chargé de la direction ; ce n'est certes pas une économie que d'abandonner la conduite du bouclier entre les mains du premier venu, on s'expose à le voir perpétuellement osciller autour du tracé théorique et à le mettre promptement hors de service.

Bouclier à pleine section. — Les boucliers circulaires ont une

tendance marquée à tourner sur eux-mêmes et à dévier constamment dans le même sens ; cette propriété depuis longtemps dénoncée peut tenir au non-parallélisme des axes des vérins ; il serait bon qu'on pût agir après coup sur les brides ou les étriers de fixage pour modifier le réglage dans la mesure convenable. D'autres fois elle résulte de la position excentrée de la machinerie, pompes, bac à eau et dynamos ; on équilibre ces masses par des surcharges qu'on augmente ou diminue suivant la tendance du moment. En terrain dur, surtout si le sol est incompressible, le mouvement est plus difficile, on s'y oppose sans peine.

Quel que soit le terrain les tassement sont à prévoir; il convient donc de se tenir toujours quelques centimètres trop haut.

On vient aisément à bout des résistances partielles par la seule action des vérins ; plus ceux-ci seront nombreux et rapprochés, plus sera faible l'effort à demander à chacun et plus la précision à attendre de la manœuvre sera grande. En marche normale, toutes les presses doivent, au moment de la course, avancer de quantités égales en des temps égaux ; on assure cette concordance en postant deux ou trois ouvriers à gauche et à droite et en leur faisant annoncer à voix haute à des intervalles de temps égaux la quantité dont sort chaque tige ; dès qu'une de ces quantités dépasse les autres, on suspend momentanément l'admission de l'eau dans le vérin correspondant. Pour qu'une pareille manœuvre soit possible, il faut naturellement que les vérins soient indépendants les uns des autres, chacun ayant sa manette de commande numérotée et à portée de la main du mécanicien.

La même méthode peut servir à ramener le bouclier dans la bonne direction s'il s'en est écarté ; pour faciliter la déviation horizontale ou verticale, on prépare à l'avance l'excavation, on fouille davantage le côté dont on veut se rapprocher, on laisse au contraire du gras à l'opposé, cela évite de soumettre l'engin à une compression latérale trop forte. Quelques dispositifs sont plus énergiques, on n'y doit recourir que dans les cas extrêmes : ils consistent à engager des butons obliques sous l'avant-bec et contre la paroi dont il faut s'éloigner, l'engin ne peut avancer

qu'en redressant ces chandelles et par suite en déviant de sa direction primitive.

Boucliers à demi-section. — Avec les boucliers à demi-section, les plus répandus aujourd'hui, des précautions spéciales s'imposent pour la préparation du chemin de glissement ou de roulement.

Quand les piédroits sont construits à l'avance et arasés au niveau convenable, toute difficulté disparaît, surtout avec l'emploi de sabots à talon ou de guides latéraux ; l'habileté du mécanicien consiste à ne pas fatiguer les appuis par des efforts horizontaux, en mettant à profit les multiples ressources qu'il trouve dans la souplesse de sa machinerie.

Quand on reporte la charge sur le fond de la fouille par l'intermédiaire de rails ou de rouleaux, la pose et le réglage des chemins sont une opération délicate. Pour préciser ce que nous voulons en dire, nous prendrons comme exemple les boucliers Champigneul du Métropolitain parisien ou du collecteur de Bièvre dont le mode d'appui a paru le meilleur.

Alignements droits. — Les rails sont fixés à des traverses dont on place le milieu dans le prolongement de l'axe du souterrain, à la hauteur voulue ; à cet effet l'agent chargé de donner la direction a préalablement posé un piquet nivelé avec précision ; il suffit au chef de poste d'une règle et d'un niveau de poche pour opérer avec exactitude ; un même piquet peut servir pour trois ou quatre courses si l'on est en palier ; en pente ou en rampe, on en multiplie le nombre. De temps à autre on vérifie la justesse du tracé suivi par une visée faite de l'arrière sur deux lampes-plomb pendues au bouclier sur l'axe de la queue et de l'avant-bec ; sur quelques chantiers on s'est très bien trouvé d'avoir tracé sur les poutres maîtresses un trait parallèle aux génératrices d'extrados de l'enveloppe ; à un moment quelconque avec une règle et un niveau on peut constater que l'inclinaison de l'engin est bien celle du projet. En cas d'erreur on fait placer les traverses prochaines plus haut ou plus bas pour rattraper la différence ; il convient de tenir compte dans cette opération de l'inertie de l'outil qui ne saurait changer instantanément de direction.

En bon terrain, vieux remblais, calcaires, argiles ou marnes dures, le tassement sous la charge des terres et le poids du bouclier ne dépasse guère 4 à 5 cm. ; c'est à cette hauteur qu'on se tiendra au-dessus de la cote projetée. En terrain compressible, on fera un platelage composé de deux files de madriers croisés pour répartir les pressions sur la plus grande surface possible ; si les tassements se produisaient quand même, on battrait des pieux sous les semelles ; il va sans dire que ce dernier cas est exceptionnel. Dans des terrains fluents c'est un bouclier à pleine section qu'on emploie, fermé par une cloison ; or on a maintes fois prouvé qu'un tel engin ne peut s'enfoncer, pour cette raison qu'il pèse moins que la terre dont il tient la place.

Courbes. — En courbe, on calcule les quantités dont les milieux des différentes traverses doivent être déplacés à gauche ou à droite de l'axe ; on reporte ces longueurs sur le sol par le fil à plomb et des réglettes graduées ; quand l'axe primitif passe en dehors du souterrain on opère par tangentes successives ou par tout autre procédé ; les méthodes les plus simples et les plus rapides sont alors les meilleures. Dans les villes où l'on se tient à une faible profondeur sous la chaussée, il y a avantage à tracer la courbe par-dessus et à forer de petits sondages dans lesquels on descend un fil à plomb.

Dans les courbes, la paroi extérieure concave a un développement plus grand que la paroi intérieure convexe ; il faut en tenir compte, et pour les rails de glissement, et pour les couchis, et pour les vérins. Pour les rails, on interpose entre leurs abouts des cales en forme de coin ; pour les couchis, il en faut un jeu de longueurs variables ; pour les vérins, on pourrait se borner à limiter la course des presses intérieures, il n'est pas prudent de compter à ce point sur leur indépendance, il vaut mieux interposer des cales d'épaisseur convenable, d'autant plus que l'obliquité de la poussée par rapport à l'axe de la butée est une cause sensible de fatigue.

Avec les rouleaux en fonte, le réglage ne porte que sur le nivellement du platelage ; en courbe, il est malaisé de les maintenir inclinés les uns par rapport aux autres ; et quand on veut dépla-

cer brusquement l'engin, ils ripent parfois dans le sens de leur longueur.

Exécution de la maçonnerie. — Si l'on ne veut pas que le chantier de maçonnerie retarde l'avancement, on l'organisera pour un travail aisé et rapide. En l'étendant sur une grande longueur comme on fit au collecteur de Clichy *extra muros* et au chantier Sully de la Compagnie d'Orléans, on lui donne une élasticité parfaite ; mais l'emploi simultané d'un bouclier et de blindages à l'arrière est inadmissible.

C'est sous l'enveloppe que le revêtement doit s'exécuter ; on allongera donc la queue jusqu'à la limite compatible avec la stabilité, de façon à répartir la construction sur deux ou trois échelons. La continuité est le premier élément de la rapidité, on se gardera donc des causes d'arrêt, on évitera que les maçons soient interrompus ou seulement gênés dans leur travail par le service d'évacuation des déblais, les opérations de montage des cintres, le report de la butée ; il faut surtout qu'on n'ait pas besoin de démonter à chaque instant leurs planchers volants et que les matériaux arrivent jusqu'à eux sans entraves.

Bourrage. — Un certain jeu est nécessaire entre la tôle de l'enveloppe et le revêtement, quel qu'il soit, pour la possibilité du glissement de celle-là sur celui-ci ; avec la maçonnerie ce vide annulaire est de quelques centimètres, par suite des rugosités de l'extrados et de la fragilité du dernier anneau ; cet espace, joint à l'épaisseur de la tôle, aux arrachements produits dans la surface de la fouille par les mineurs ou par le couteau lui-même, atteint des dimensions telles que si on ne le comble pas, des mouvements importants de terrain se produisent et se transmettent jusqu'au sol ; il y a là pour les constructions voisines un danger auquel on s'efforce de parer, non pas seulement dans les villes mais même en rase campagne.

On réussit sans peine à boucher le vide laissé sous l'enveloppe ; on le garnit soigneusement de mortier fin que le bouclier lisse lui-même, dans son mouvement, en une chape protectrice contre les infiltrations d'eau.

Il est moins aisé de compenser l'épaisseur de l'enveloppe et les petites excavations de la périphérie ; on a tenté bien des procédés, aucun n'a donné une réussite parfaite : le bourrage au sable, le refoulement de mortier avec des battes en bois ou des fiches de poseur de pierres, l'injection.

L'impossibilité où l'on fut souvent de bourrer convenablement la voûte sur les reins a conduit à couper les tôles de la queue le plus haut possible au-dessus du niveau des naissances ; sans cette précaution la voûte mal appuyée se fissurait en clef.

Quant à la partie supérieure, dès que la tôle de la queue échappe, les terres ébranlées tombent sur l'extrados.

Injection. — Dans le travail à l'air comprimé, la surpression intérieure oblige le garnissage de mortier qu'on coule en couronne à remplir tous les vides dès qu'ils se démasquent ; dans les travaux ordinaires, on pensa arriver au même résultat par l'injection soit de ciment, soit de chaux.

Le but est-il atteint ? Il serait téméraire de l'affirmer. Sans doute on peut attendre beaucoup de cette méthode dans un terrain consistant, peu mobile, à condition de suivre pas à pas l'avancement, et non d'opérer par sections quelque temps après l'achèvement. Mais dans les villes nous avons signalé à plusieurs reprises des insuccès ; le mortier refoulé va n'importe où, il remplit les ouvrages voisins : collecteurs, caves, conduits, en pénétrant au travers des fissures, ou bien il se creuse une chambre en refoulant le terrain meuble au droit du trou de coulée.

Cela ne veut pas dire que l'injection soit inutile, elle a toujours pour effet de protéger le revêtement, ce qui est précieux s'il est métallique, et d'augmenter d'une façon sensible la densité et la cohésion des terres de la périphérie ; mais ce serait se préparer de graves déboires que de compter sur elle pour prévenir tous tassements ; ceux-ci sont d'autant plus inévitables que le bouclier par son fonctionnement même laboure, bouleverse, entraîne les couches qu'il traverse.

On continuera donc de l'employer, pour boucher des petites fissures qui, pour être invisibles n'en sont pas moins dangereuses,

surtout si l'on a lieu de craindre que la maçonnerie ait souffert, par exemple sous l'effort de la queue. La fluidité, la pression sont une question d'espèce ; en général 3 à 4 kg. par centimètre carré suffisent.

Incidents et accidents. — Nous ne pouvons pas indiquer ici la série des incidents susceptibles de se produire au cours du travail ; le remède à apporter dans chaque cas particulier dépend des circonstances, de l'engin, du terrain, des moyens dont on dispose ; il n'est pas de solution générale applicable dans tous les cas : c'est affaire d'observation, de jugement et de décision.

A l'avant, on craindra les glissements de terrain, les éboulements, les effondrements ; on exercera une surveillance constante, on suivra avec attention l'allure des couches, parfois même on fera des sondages de temps en temps ; en tous cas on ne se fiera pas aux déductions établies à priori et on restera prudent. Si, malgré toutes les précautions prises, des accidents surviennent, on s'efforcera d'en limiter l'effet et de rémédier aux conséquences le plus promptement et le plus économiquement possible.

A l'arrière, avec le revêtement maçonné, le plus fréquent mécompte est le frottement de la queue sur l'anneau encore frais ; on veillera à maintenir un vide suffisant entre l'enveloppe et l'extrados, ce qui obligera à donner an bouclier une section supérieure à celle de l'ouvrage à exécuter. Dans les cas exceptionnels où l'engin menacera de se renverser en arrière, avec de petits butons inclinés engagés sous la tôle et sur les couchis on le forcera à se relever au moment de la course.

Quand l'appui s'effectue sur les cintres entretoisés, l'ensemble des cintres recule sous l'effort des vérins puis revient à sa position d'équilibre en entraînant le dernier anneau clavé ; il n'y a pas d'autre remède à cela que de multiplier le nombre et la force des butées pour diminuer la compression exercée sur chacune et, suprême ressource, de caler les couchis contre la poutre avant du bouclier pour les empêcher d'accompagner les cintres dans leur mouvement.

Quant aux tassements, puisqu'il n'est pas possible de les éviter, on se résignera à les voir se produire, au moins cherchera-t-on

à les réduire au minimum ; dans les villes il arrive parfois que le mouvement des terres au-dessus de l'engin ne se transmet pas jusqu'à la surface ; la chaussée bétonnée ou pavée forme voûte et reste suspendue au-dessus du vide ; il n'y a là qu'un trompe-l'œil ; il est prudent de démolir soi-même la chaussée et de la refaire, sans attendre les accidents qui ne manqueraient pas de se produire au passage des lourdes charges.

Emploi de l'air comprimé. — Les travaux à l'air comprimé sont aujourd'hui devenus d'une telle fréquence qu'on y a acquis une expérience consommée ; cependant peut-être n'est-il pas inutile de rappeler à quelles difficultés spéciales on se heurte dans l'exécution des souterrains.

La pression hydrostatique varie régulièrement du sommet à la base de l'engin ; si la pression d'air qu'on admet est celle de la partie supérieure, on risque de voir les rentrées d'eau se produire par le bas ; si c'est celle de la partie inférieure, on s'expose au soufflage : le terrain supérieur, pas assez pesant, est violemment soulevé et la pression tombe tout à coup. Les dispositions doivent être telles qu'on puisse immédiatement fermer les orifices de la cloison ; la pression rétablie, on reprend la marche après avoir bouché avec des sacs de terre et avec de l'argile toutes les issues de l'air.

Jusqu'à la pression de une atmosphère, les hommes en bonne santé n'éprouvent aucun malaise, ceux qui sont souffrants doivent s'abstenir de travailler dans ces conditions ; une durée de huit heures de séjour n'est pas excessive, mais on obtiendra un meilleur rendement en se limitant à six heures.

L'air doit être aussi pur que possible, ce que permet seul l'éclairage électrique. Pour éviter une température élevée, on interposera un réservoir entre le compresseur et la galerie ; au siphon de l'Oise un compresseur qui envoyait directement l'air dans le tunnel fut trouvé très incommode pour cette raison.

Nous avons déjà parlé des différents types de sas à air, en métal, en maçonnerie, ou mixtes ; beaucoup d'ouvriers prétendent qu'avec la maçonnerie le refroidissement par la décompression brusque est moindre, il est certain que la tôle, plus conductrice

que la pierre, se prête davantage aux variations de température. Pour prévenir les accidents, il est bon :

De limiter la rapidité de la décompression à la sortie en employant, par exemple, comme on le fit au siphon de l'Oise, des robinets diaphragmés;

D'avoir en mauvais terrain une écluse de sûreté d'accès aisé, toujours ouverte ;

Et même de se ménager, rien que par la présence de deux diaphragmes voisins du bouclier, une sorte de cloche à air où le personnel pourra toujours respirer, même en cas d'arrivée d'eau violente.

La surpression intérieure servira à l'assainissement : un tuyau fonctionnant comme éjecteur suffira, le plus souvent, à conduire l'eau au dehors ; si les filtrations sont abondantes, on emploiera des pompes.

Au siphon de l'Oise, on a pu éviter les pertes d'air par l'intervalle resté libre entre le revêtement et le bouclier, rien qu'en le bouchant avec une couronne d'argile au travers de laquelle on effectuait le bourrage. — Ce procédé si simple a donné les meilleurs résultats.

Comme les wagonnets doivent traverser le sas à air, on ne saurait prétendre à une grande rapidité d'évacuation des déblais; il faut néanmoins que le service soit organisé de façon telle qu'il ne retarde pas l'avancement ; d'où la nécessité de donner aux sas et aux écluses des dimensions suffisantes et d'installer un mode de traction simple et énergique, par câble par exemple.

Vitesses réalisées. — La vitesse d'avancement ne dépend pas seulement de la nature des terrains traversés, mais surtout de l'habileté et du soin apportés à l'agencement général. Dans les grands souterrains, on dispose de plus de place, il est plus aisé d'assurer l'indépendance de chaque service, l'avancement journalier est plus grand ; dans les petits, le travail n'est pas toujours facile, on va moins vite.

Le tableau ci-dessous donne la vitesse moyenne et la vitesse maxima des différents boucliers que nous avons décrits; en comparant entre eux les chiffres qui concernent les engins em-

ployés à l'exécution de souterrains identiques, on verra quelle influence exerce sur le rendement une organisation judicieuse des chantiers; cela explique que nous ayons si souvent insisté sur la nécessité d'une étude approfondie des moindres détails d'installation.

ENGINS	VITESSE maxima	VITESSE moyenne	OBSERVATIONS
	m.	m.	
Clichy *extra muros*.	9,10	4,51 ou 5,45	Demi-section
Clichy *intra muros*.	»	2,85 ou 3,20	Pleine section
Compagnie d'Orléans. Bouclier Sully.	6,76	2.40	Demi-section
Compagnie d'Orléans. Boucl. Institut.	4	3.04	—
Collecteur de Bièvre. Bouc. Ministère.	2,71	1,50	—
— Bouclier Solférino.	»	4	—
— Bouclier Dioudonnat	2,20	1,30	—
Métropolitain parisien. Boucl. Champigneul (Vincennes).	4	3.87	—
Métropolitain parisien. Boucl. Champigneul (Reuilly)	4	3,55	
Métropolitain parisien. B. (8e lot). .	3,28	2,40	
— Bouclier Dioudonnat (Diderot).	2	1,12	
Métropolitain parisien. Bouclier Dioudonnat (Lyon).	2,75	1,95	—
Métropolitain parisien. Bouclier Dioudonnat (Saint-Antoine).	2,45	1,28	—
Métropolitain parisien. Bouclier Weber (Saint-Paul).	1,95	0,60	—
Métropolitain parisien. Bouclier Weber (Châtelet).	3,48	1,60	—
Métropolitain parisien. Bouclier Lamarre (6e lot).	2	0,60	—
Métropolitain parisien. Bouclier Lamarre (7e lot)	2,50	1,60	—
Compagnie de l'Ouest. Viroflay. . .	3	1.50	—
Siphon de l'Oise.	»	0,80	Pleine section
Tunnel de Boston	»	2,64	Demi-section

Les vitesses maxima ne signifient pas grand'chose, elles correspondent à des circonstances exceptionnelles : terrain facile, équipes de choix, fonctionnement parfait de tous les engins et de tous les services.

En fait, il faut toujours compter avec les incidents, les obstacles, les arrêts, les vitesses moyennes sont donc plus instructives. Elles montrent que dans les cas les plus défavorables, comme au tunnel de Viroflay, on a pu marcher à la vitesse de

1,50 m. par jour, que dans les terrains ordinaires secs on a parcouru de 3 à 4 m. et que dans les terrains humides, avec toutes les sujétions qu'entraîne l'air comprimé on a avancé de 0,80 m.

En substituant trois équipes de huit heures à deux de onze heures, on aurait pu tout aussi bien, au premier lot du Métropolitain parisien, effectuer deux courses par poste, c'est-à-dire progresser de 6 m. par jour. Il n'est donc pas téméraire de conclure qu'en terrain ordinaire, avec un engin judicieusement conçu et dirigé avec soin, on peut compter sur une vitesse moyenne de 4 à 5 m. par jour : les méthodes anciennes par boisage sont loin de donner d'aussi brillants résultats, si on se limite, bien entendu, à une seule attaque.

Prix de revient. — Il n'est pas possible de donner les prix de revient effectifs : ou bien les entrepreneurs n'ont pas cherché à les établir, en dégageant de l'ensemble des dépenses d'un chantier étendu celles qui ressortissent au compte du bouclier, ou bien ils ne tiennent pas à les communiquer, dans la crainte qu'on puisse se fixer sur l'importance de leurs gains ou de leurs pertes.

Seuls les prix de revient du premier lot du Métropolitain parisien, exécuté en régie, auraient toutes les qualités d'impartialité désirables.

Mais le compte n'en sera fait qu'après l'achèvement complet des travaux, on ne saurait pour le moment en parler.

ENGINS	DIAMÈTRE de l'ouvrage	PRIX du projet	RABAIS d'adjudication	PRIX NETS rabais déduit
	m.	fr.	p. 100	fr.
Clichy *extra muros*	7.20	1016.60	»	1016.60
— *intra muros*	7,20	1130	31	769,55
	6.10	960	31	662.40
Siphon de l'Oise.	2,63	»	»	1245,93
Viroflay.	10,55	1500	20	1200

Nous nous bornerons à indiquer les prix d'adjudication, au mètre courant, de quelques-uns des ouvrages dont nous nous sommes occupés au cours de cette étude.

Ces prix ne sont guère comparables entre eux, en raison des différences que présentent les divers souterrains en ce qui concerne le diamètre, la nature et l'épaisseur du revêtement, les difficultés résultant du terrain...

Quand on emploie le bouclier, la longueur du tunnel doit nécessairement intervenir dans la fixation du prix de revient unitaire, puisqu'il s'agit d'amortir une dépense de premier établissement s'élevant à 100 000 fr. et plus. En général, le bouclier s'il a été bien construit, n'est pas hors de service même après un très long parcours; si donc on avait à percer successivement deux ou plusieurs ouvrages identiques où le même engin pourrait servir, on réaliserait de ce chef une économie sérieuse.

Parcours. — Nous avons donné une fois déjà le tableau des parcours des différentes armatures, il est inutile d'y revenir; on ne peut pas d'ailleurs tirer de ce tableau d'indications sérieuses sur la durée probable de l'engin : quand le fonctionnement a cessé, c'est le plus souvent que le percement était terminé ou que l'armature était inutilisable, non par suite d'usure, mais à cause d'un vice de construction ou d'une erreur de conception.

CHAPITRE IV

CONCLUSION

Résumé. — En résumé, les nouvelles méthodes de percement des souterrains ont pris dans ces dernières années un essor considérable.

Jusqu'en 1895 le bouclier n'avait pour ainsi dire pas changé d'affectation ni de forme. Son but était de traverser les terrains difficiles, ébouleux, fluents ou chargés d'eau : argiles, graviers, vases, boues, qu'on n'osait ou ne pouvait attaquer par les procédés ordinaires de boisage, soit qu'ils n'offrissent qu'une sécurité insuffisante, soit qu'ils ne permissent qu'imparfaitement de recourir à l'emploi de l'air comprimé. Son rôle restait presque exclusivement limité à l'exécution des tunnels sous les cours d'eau ou sous les bras de mer, à faible distance du fond.

La forme n'avait guère varié ; on n'avait pas voulu renoncer à la section circulaire, admissible pour les égouts, mais illogique pour les chemins de fer ; tous les perfectionnements avaient porté sur les dispositions de détail, avec succès d'ailleurs : l'allongement de la chambre de travail, la présence d'une cloison verticale, la division de l'avant-bec en cellules indépendantes, au besoin un sas à air, permettaient d'appliquer l'engin avec une entière certitude de réussite à tous les terrains, si mauvais qu'ils fussent.

D'autre part, la transformation progressive et rationnelle des moyens mécaniques de propulsion, l'emploi de vérins hydrauliques commandés par de puissantes pompes mues électriquement, en faisaient un véritable outil automobile, obéissant, souple et précis.

Le revêtement était resté métallique par suite de la conservation de la forme circulaire et de la nécessité d'une étanchéité absolue; d'un emploi commode à cause de la division en segments semblables et interchangeables, d'un calcul simple déduit de lois et de formules classiques, il rendait inabordable la construction des grands ouvrages, par suite de son poids et de son prix de revient.

La tentative du collecteur de Clichy *extra muros* fut une révélation; on s'aperçut, pour la permière fois, qu'à condition de le modifier judicieusement, on pouvait faire du bouclier un instrument merveilleux, utilisable à autre chose qu'au franchissement des rivières et à la pose d'anneaux de fonte ou de fer. Immédiatement son emploi se généralisa sur les nombreux chantiers de travaux souterrains que l'approche de l'Exposition universelle de 1900 avait fait ouvrir.

Nous l'avons déjà dit, l'expérience fut un peu hâtive et précipitée. On aurait obtenu des résultats plus complets si, au lieu de fonctionner presque simultanément, les différents engins avaient été mis en service à des intervalles de temps assez éloignés pour que les insuccès des uns fussent profitables aux autres.

Néanmoins, du rapprochement et de la comparaison des armatures et des chantiers, plusieurs conséquences se dégagent : dans cette deuxième partie de notre étude nous nous sommes efforcé de les mettre en lumière et d'en tirer les enseignements qu'elles comportent.

Conclusion. — Quelle sera la conclusion finale? En quelques lignes elle se peut résumer.

D'abord, l'emploi d'un bouclier reste la meilleure solution, sinon la seule, toutes les fois qu'il s'agit de terrains exceptionnels où la question d'économie n'est que secondaire; avec des dispositifs convenables il assure une sécurité absolue, et pour les agents, et pour l'ouvrage; c'est une qualité précieuse à laquelle on ne saurait renoncer, quand bien même on devrait l'acheter au prix d'un supplément de dépense.

Pour la construction des égouts circulaires ou elliptiques, même

en très bon terrain, une armature métallique fonctionnant à pleine section est d'autant plus avantageuse que la longueur de l'ouvrage est plus grande ; outre qu'on réalise l'économie des boisages et blindages, par l'établissement simultané de tout le revêtement en maçonnerie ou en béton, on supprime les pertes de temps, les dépenses, les aléas qu'entraînent les reprises en sous-œuvre. Les armatures à demi-section sont sous ce rapport moins recommandables, mais elles sont plus légères, plus maniables et beaucoup moins coûteuses, c'est-à-dire qu'on les utilisera plutôt pour de faibles parcours.

Pour le percement des tunnels de chemins de fer, l'armature ne correspond qu'à la calotte. Il importe que ses différentes parties soient calculées de façon à donner le maximum de stabilité, que le mode d'appui se prête à une direction parfaite en plan et en profil. Sous la double condition d'être bien conçue et habilement dirigée, elle a plusieurs avantages : elle met à l'abri des éboulements et des accidents de toute nature, elle supprime les étaiements dispendieux, elle permet de remplacer au front d'attaque la plupart des mineurs par de simples terrassiers, elle progresse vite. Mais par elle-même elle coûte cher, elle comporte une installation générale onéreuse, et elle exige un personnel de surveillance et de direction prudent et instruit.

L'hésitation entre les anciennes et les nouvelles méthodes reste donc possible, surtout dans les villes. L'insuffisance du poids des terres sur l'extrados, la proximité de la chaussée, l'entraînement des couches traversées, font que le maintien de la circulation n'est pas aisé : il devient impossible dès que l'engin, mal équilibré, prend ce que nous avons appelé un mouvement de galop. En général, dans les travaux urbains on veut aller très vite, le bouclier, quelle que soit la rapidité de son fonctionnement, reste un procédé lent par le fait d'une attaque unique : nouvelle cause d'infériorité.

Quant au revêtement on peut dire que le métal a fait son temps : il ne sera plus guère utilisé, en France du moins, que pour les petits ouvrages. La maçonnerie moins coûteuse s'exécute avec facilité, son emploi se généralisera de plus en plus.

Que reste-t-il à faire ? Beaucoup assurément.

Il faut empêcher que la maçonnerie se fissure, soit par le frottement de la queue, soit par le retour à leur position d'équilibre des cintres ou des couchis comprimés par l'effort des presses.

Il faut éviter les mouvements et les tassements du sol, soit en trouvant moyen de boucher immédiatement les vides, soit en prévenant la formation.

Il faut perfectionner le mode d'appui, et de glissement, rendre la direction plus aisée et plus sûre, accroître le rendement.

Il faut, enfin, varier la nature du revêtement en poursuivant l'économie, la rapidité d'exécution et la résistance : le béton armé, n'a été que peu employé jusqu'ici, peut-être donnerait-il d'intéressants résultats ; il diminuerait les dimensions de la fouille et par lui-même serait peu onéreux. Pourquoi à ces deux avantages n'ajouterait-il pas celui de réaliser une butée des vérins parfaite, c'est-à-dire nullement préjudiciable à la solidité du revêtement lui-même ?

Ainsi la méthode nouvelle n'a pas encore donné tout ce qu'on est en droit d'en attendre ; un vaste champ de recherches reste ouvert : outil, machinerie, revêtement, butées, appui, sont à perfectionner

Mais si l'on songe qu'en quelques années seulement les progrès ont été considérables, il n'est pas téméraire de croire que l'ingéniosité des constructeurs réussira à triompher de ces multiples obstacles ; d'étape en étape, par une marche raisonnée, on arrivera à faire du bouclier un outil applicable à la plupart des terrains et doué de ces qualités précieuses : la souplesse, la sécurité, la rapidité et l'économie.

Nous serions heureux, quant à nous, et amplement récompensé, si par cet exposé impartial des faits, par cette relation fidèle des difficultés rencontrées, des déboires éprouvés, comme des succès remportés, nous pouvions contribuer, non pas à guider les recherches et à préparer la victoire, mais seulement à éviter que les bonnes volontés ne s'égarent dans des voies déjà démontrées dangereuses par la pratique.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE IV

COLLECTEUR DE BIÈVRE

CHAPITRE V

CHEMIN DE FER MÉTROPOLITAIN DE PARIS

Bouclier du septième lot.

CHAPITRE VI

LIGNE D'ISSY A VIROFLAY
(Compagnie des chemins de fer de l'Ouest.)

SOUTERRAIN DE MEUDON

Bouclier Fougerolle.

CHAPITRE VII

DÉRIVATION DES SOURCES DU LOING ET DU LUNAIN

PREMIER LOT

CHAPITRE VIII

APPLICATIONS DE LA MÉTHODE A L'ÉTRANGER

I. — TUNNEL DE BOSTON

IV. — CENTRAL LONDON RAILWAY

V. — EGOUTS DE MELBOURNE

VI. — TUNNEL DE L'YARRA

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE PREMIER

DE LA MÉTHODE

CHAPITRE II

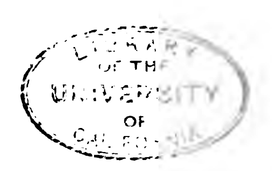
DE L'ENGIN

CHAPITRE III

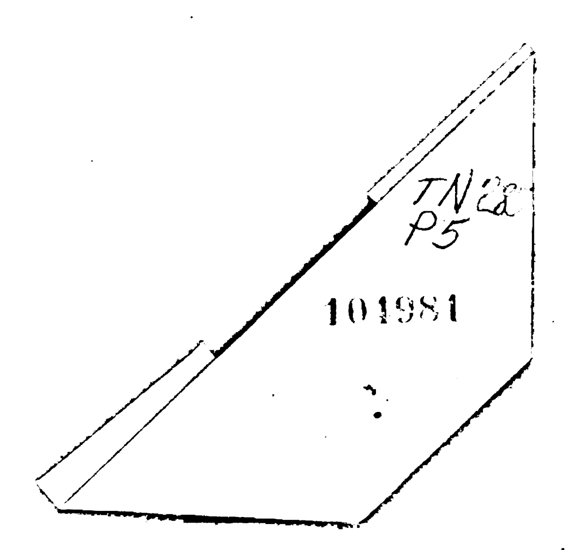
UTILISATION DE L'ENGIN

CHAPITRE IV

CONCLUSION



ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY


TN 28
P5
104981